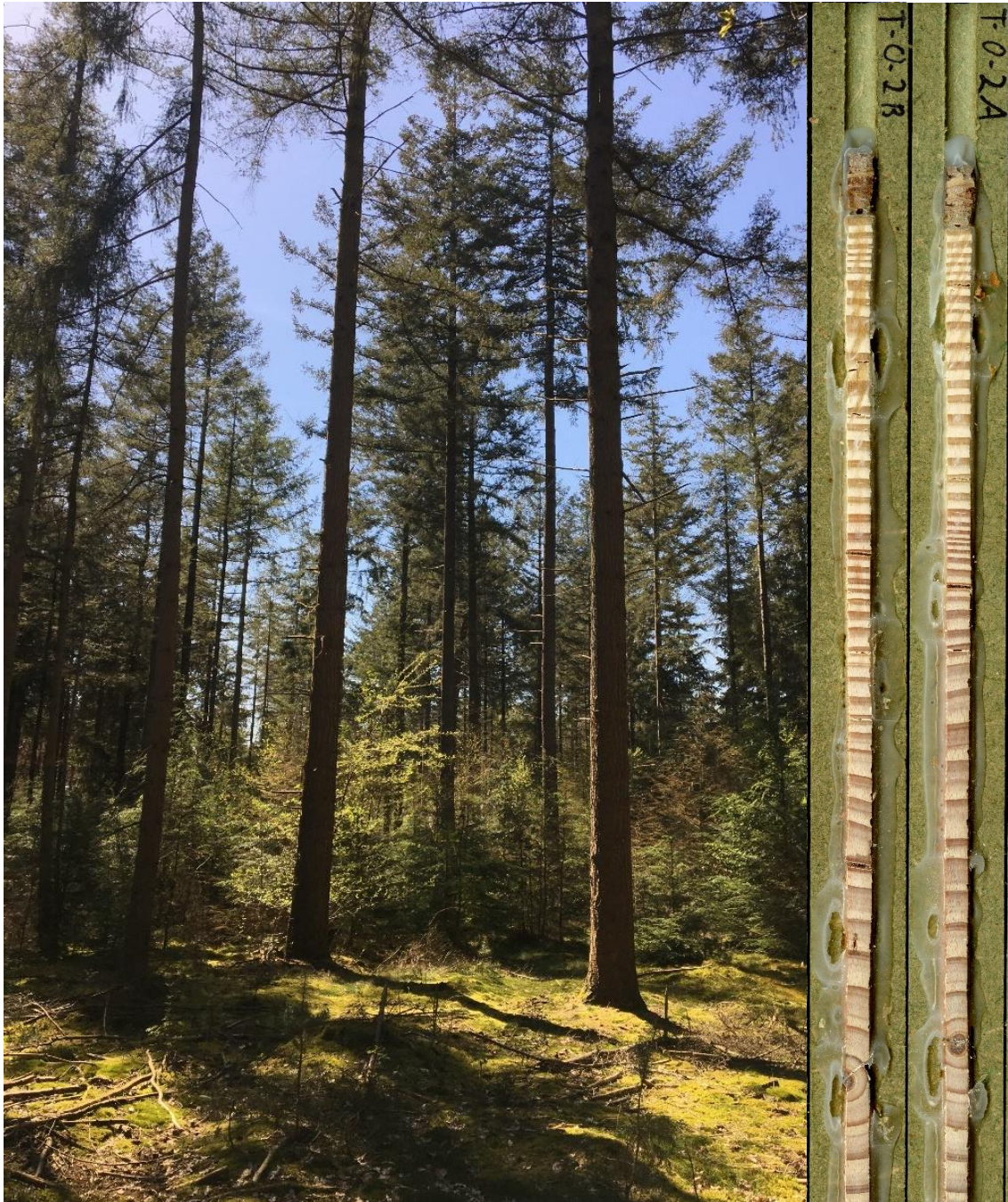


From top to toe: Droogteschade bij Douglas, a remote approach

Onderzoek naar de impact van droogte op de kroonvitaliteit en de stamgroei van Douglas, en de bruikbaarheid van *remote sensing* om droogteschade waar te nemen.



Colofon:

Opdrachtgever:	Lectoraat Duurzaam bosbeheer, Hogeschool van Hall Larenstein
Titel:	<i>From top to toe: Droogteschade bij Douglas, a remote approach</i>
Status:	Eindversie
Datum:	12-6-2023
Auteur:	Yordi van Duijn
Begeleidend docent:	dr. Mart Vlam
Externe begeleider:	dr. Ute Saß-Klaassen
Opleiding:	Bos- en Natuurbeheer
Major:	Beheer van Bos en Natuur
Onderwijsinstelling:	Hogeschool van Hall Larenstein

Afbeeldingen omslagpagina: Yordi van Duijn

Alle afbeeldingen in dit rapport zijn gemaakt door de auteur, tenzij anders vermeld.

©Yordi van Duijn, juni '23
Postbus 9001
6880 GB Velp
Telefoon: 026 3695695
www.hogeschoolvhl.nl

Voorwoord

Met trots presenteer ik hierbij mijn afstudeerscriptie getiteld "*From top to toe: Droogteschade bij Douglas, a remote approach*". Deze scriptie vormt het resultaat van mijn afstudeerperiode aan de opleiding Bos- en Natuurbeheer, die plaatsvond van februari tot juni 2023.

Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Lectoraat Duurzaam Bosbeheer. Ik wil mijn opdrachtgever, lector Ute Saß-Klaassen, hartelijk bedanken voor de kans om als eerste student af te studeren binnen het lectoraat en voor de waardevolle sparsessies die hebben geleid tot een beter inzicht. Het is een bijzondere ervaring geweest om samen te werken aan dit belangrijke onderwerp.

Ik ben dankbaar voor de begeleiding en ondersteuning die ik heb ontvangen tijdens mijn afstudeerperiode. Mijn oprechte waardering gaat uit naar mijn begeleider, Mart Vlam voor deskundige begeleiding en waardevolle inzichten. Daarnaast wil ik het Dendro-team van Wageningen University and Research bedanken, met speciale dank aan Mathieu Decuyper voor zijn hulp bij de verwerking van de AVOCADO-data, Ellen Wilderink voor haar begeleiding bij het prepareren van de boorkernen en Meike Bouwman voor haar hulp bij de analyse in "R".

Ook wil ik mijn dank uitspreken aan Etiënne Thomassen en Harm van den Heuvel van de Bosgroep Zuid, die de onderzoeksofstanden beschikbaar hebben gesteld. Hun medewerking heeft een essentiële bijdrage geleverd aan dit onderzoek.

Daarnaast wil ik graag al mijn vrienden bedanken die hebben bijgedragen door feedback te geven op mijn scriptie. Jullie waardevolle input heeft mij geholpen mijn werk te verbeteren.

Tot slot wil ik een speciale dank uitspreken aan mijn ouders en mijn vriend Maarten Veld, die mij gedurende het hele proces hebben gesteund. Jullie aanmoediging en steun zijn een onschatbare waarde geweest.

Met dit voorwoord wil ik mijn dankbaarheid uiten aan iedereen die heeft bijgedragen aan het succesvol voltooien van mijn afstudeeronderzoek. Het is een waardevolle ervaring geweest en ik kijk ernaar uit om de resultaten te delen en bij te dragen aan het duurzame bosbeheer van de toekomst.

Velp, juni 2023

Yordi van Duijn

Samenvatting

Klimaatverandering en de daarmee gepaard gaande frequente droogteperiodes (Spinoni et al., 2013) hebben de laatste jaren geleid tot verlies van vitaliteit in de Nederlandse bossen (Copini et al., 2022). Ook Douglas sparren hebben te maken gehad met verlies van vitaliteit en groei (Zoeteman, 2021). Om als bosbeheerder adequaat te kunnen reageren, is het belangrijk om een goed inzicht te hebben in de effecten van klimaatverandering op de groei van Douglassen. De huidige methoden, zoals veldinventarisaties en jaarringanalyses, vergen echter veel tijd en mankracht. Het gebruik van *remote sensing* kan hier een oplossing bieden.

In deze studie worden beide methoden toegepast: de analyse van kroonvitaliteit met behulp van satellietbeelden via het programma Anomaly Vegetation Change Detection (AVOCADO) en de analyse van de radiale stamgroei door middel van jaarringonderzoek. Het doel is om te onderzoeken of veranderingen in de kroonvitaliteit van Douglassen gedurende jaren met extreme droogte en mogelijk daaropvolgend herstel overeenkomen met veranderingen in het groeipatroon van dezelfde bomen. Dit onderzoek beoogt de informatie die beide methoden leveren voor het detecteren van vitaliteitsverlies en herstel te beoordelen en te bespreken, en de toepasbaarheid van *remote sensing* als grootschalig monitoringsinstrument te onderzoeken.

Twee Douglasopstanden ten zuidoosten van Tilburg zijn onderzocht: één opstand met duidelijk verlies aan kroondichtheid en één gezonde opstand. Van elke opstand zijn 16 dominante bomen met een kroondichtheid die overeenkomt met het algemene beeld van de opstand, aangeboord voor jaarringonderzoek. Klimaat-groeianalyses zijn uitgevoerd om het effect van droogte op de groei van de bomen te onderzoeken. Er is een vergelijking gemaakt tussen kroonvitaliteit en jaarringbreedte om inzicht te krijgen in het effect van verminderde kroonvitaliteit.

Zowel de vitale als de niet-vitale opstanden vertonen een afname van groei in het droge jaar 2018. Het herstel van de groei na droogte is sterker in de opstand met een vitale kroon. Alleen in de niet-vitale opstand zijn veranderingen in kroonvitaliteit gedetecteerd met behulp van AVOCADO. Het droge jaar 2018 wordt bij alle niet-vitale bomen gekenmerkt als een jaar met verminderde kroonvitaliteit.

Er is een verschil in groeidynamiek waargenomen tussen Douglasopstanden met en zonder zichtbare kroonverlichting, met name met betrekking tot het herstel. Opstanden met verminderde kroonvitaliteit hebben een langere herstelperiode. Hoewel veranderingen in kroonvitaliteit kunnen worden gedetecteerd met *remote sensing*, is het monitoren van groeiveranderingen bij douglas sparren niet mogelijk met deze methode.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting.....	4
1. Inleiding	6
1.1. Maatschappelijk kader	7
1.2. Wetenschappelijk kader	8
1.3. Probleemanalyse	10
1.4. Doelstelling en duurzaamheid.....	11
1.5. Randvoorwaarden en afbakening	11
2. Methode.....	12
2.1. Datacollectie.....	12
2.2. Labwerk	13
2.3. Statistische analyse	14
3. Resultaten	17
3.2. Klimaat-groeirelatie voor de vitale en niet-vitale opstand	20
3.3. Droogte 2018 - Vergelijking kroonvitaliteit en jaarringbreedte	25
Discussie	28
Conclusie	31
Bron vermelding.....	32
Bijlagen	37

1. Inleiding

De Nederlandse bossen moeten steeds meer functies vervullen, naast de natuurfunctie zijn zij ook bestemd voor recreatie en houtproductie. Vaak gaat dit samen in multifunctionele bossen waar de drie functies samenkomen. Het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (2020) stelt dan ook in de Bossenstrategie de ambitie om niet alleen meer natuurwaarde en recreatie mogelijk te maken, maar daarnaast ook het behoud en de promotie van het produceren en gebruiken van hoogwaardig hout. Hoogwaardige toepassingen van hout, bijvoorbeeld in de bouw, kunnen bijdragen aan het behalen van de klimaat doelen door CO₂-vastlegging (Backx, z.d.). Dit is ook terug te zien in het convenant “Green Deal Houtbouw Duurzaam uit de crisis” (2021) van de metropool regio Amsterdam. Hierin wordt de ambitie uit gesproken om vanaf 2025 één op de vijf woningen met hout te bouwen. Deze ambitie zal resulteren in een grotere vraag naar hout, en dan met name naalddhout zoals vuren van de fijnspar (*Picea abies*), grenen (*Pinus spp.*) en lariks (*Larix spp.*).

Echter, voornamelijk deze naaldbomensoorten hebben in Europa (Eilmann & Rigling, 2012; Schuldt et al., 2020; Senf et al., 2020) en Nederland (Copini et al. 2022) zwaar te lijden gehad onder de droogte van de laatste jaren. Fijnsparren, die al langer te lijden hadden onder de aantasting van de bastkever (*Ips typographus*) (Abdullah et al., 2018) sterven massaal na de droogte van 2018, welke heeft geleid tot verzwakking van de bomen (Centrum Genetische Bronnen Nederland, z.d.). Alleen in Duisland is op deze manier reeds 245.000 ha fijnsparbos verloren gegaan (BMEL, 2020). Ook voor Nederland is de verwachting dat klimaatsverandering zou leiden tot het verdwijnen van de fijnspar in zijn geheel uit het Nederlandse bosareaal (Verheyen et al., 2016). Naast de fijnspar laat zowel de Europese als de Japanse lariks een afname in groei en vitaliteit zien na droge periodes (Copini et al., 2022; Eilmann & Rigling, 2012).

Voor beheerders betekent dit een uitdaging: hoe kunnen de Nederlandse bossen worden uitgebreid of omgevormd tot bossen met meer variatie in structuur en boom- en struiksoorten, zodat ze weerbaarder worden tegen extreme klimaatgebeurtenissen en tegelijkertijd kunnen voorzien in de vraag naar hout? Een van de oplossingen waarnaar gekeken wordt is het introduceren van productieve en droogteresistente boomsoorten of herkomsten, uit gebieden met een warmer klimaat vergelijkbaar met het verwachte klimaat in Nederland over vijftig jaar. Het achterliggende concept wordt *assisted migration* genoemd (Williams & Dumroese, 2013). Hierbij wordt de natuurlijke migratie van soorten bevorderd door menselijk ingrijpen. Het nadeel hiervan is dat op voorhand niet bekend is hoe een soort zich in de specifieke Nederlandse omstandigheden, gedefinieerd door bodem en landschappelijke context, maar ook klimaat-gerelateerde factoren gaat gedragen (Van Pelt, 2022). Een belangrijk aspect is hierbij bijvoorbeeld het voorkomen van late nachtvorst, dat in een opwarmend klimaat, waarbij het groeiseizoen eerder kan beginnen een groter effect zal hebben op de bossen (Ma et al., 2019). Voor boomsoorten en herkomsten uit zuidelijke regio's die gewend zijn aan een warm voorjaarsklimaat en vroeg uitlopen kan late vorst een probleem vormen (Howe et al., 2003).

Voor het inschatten van productiviteit en droogtetolerantie van zowel inheemse maar ook exotische boomsoorten in Nederland worden tegenwoordig verschillende benaderingen gekozen. Door middel van jaarringonderzoek is het mogelijk om lange-termijn effecten op droogte te onderzoeken door te kijken naar de groeireactie en het navolgende herstel na een droogte. Dit onderzoek gebeurt echter kleinschalig op boom- en opstandsniveau (Copini et al. 2022; Song et al. 2022). Remote-sensing op basis van satellietbeelden biedt echter potentieel de mogelijkheid om grotere ruimtelijke schaal de kroonvitaliteit van bosopstanden in kaart te brengen (Decuyper et al. 2022). Daarbij wordt gebruik gemaakt van satellietbeelden om veranderingen in het kronendak, zoals kroondichtheid en daaraan gerelateerd fotosyntheseactiviteit waar te nemen (Buras et al. 2021; Grieu et al., 1988). In dit

onderzoek wordt gekeken naar (1) de mogelijkheid om een afname in kroondichtheid te detecteren met behulp van satellietmetingen en (2) of er een relatie kan worden aangetoond tussen de groei van douglas spar en een mogelijke vermindering in kroondichtheid als gevolg van droogte.

In dit onderzoek wordt ingegaan op de effecten van droogte op de vitaliteit van Douglas spar (*Pseudotsuga menziesii*) op droge zandgronden in Nederland en de mogelijkheden om vitaliteitsverlies vroegtijdig waar te nemen door middel van jaarringonderzoek en remote-sensing onderzoek (Decuyper et al., 2020). Klimaatsverandering leidt tot steeds meer weersextremen. Naast periodes van hevige regenval waren recente jaren gekenmerkt door hittegolven en droogte gedurende de zomer (IPCC, 2022). Ook bossen zijn onderhevig aan deze weersextremen (Spinoni et al., 2013). Voornamelijk de hittegolf en droogte in 2018 hebben sterke invloed gehad op de vitaliteit van veel boomsoorten in de Europese bossen (Allen et al., 2010; Schuldt et al., 2020; Schwarz et al., 2020; Senf et al., 2020). Ook in Nederlandse bossen hebben periode van droogte in 2018 tot 2020 bij sommige boomsoorten tot vermindering in groeiactiviteit geleid (Copini et al., 2022).

1.1. Maatschappelijk kader

De Douglas spar (*Pseudotsuga menziesii*) is al in de 19^e eeuw in Nederland geïntroduceerd vanwege de hoge hout kwaliteit (Spiecker et al., 2019). Er is dus al ruim ervaring met de soort in de Nederlandse omstandigheden. Douglas is in staat zich natuurlijk te verjongen in Nederlandse bossen (Thomas et al., 2022), groeit op veel standplaatsen dubbel zo snel als grove den (Forest Ecology and Forest Management Group Wageningen University, 2018; Jansen et al., 2016) en produceert hoogwaardig hout (Klaassen, 2018). Door de schaduwtolerantie kan Douglas in gemengde opstanden met beuk worden aangeplant (Jansen, 2018; Thomas et al., 2015). Het inmengen van beuk in Douglas opstanden heeft als voordeel dat de bodem minder verzuurd en draagt zo bij aan betere bodemcondities en bosstructuur dan monoculturen opstanden van douglas (Foltran et al., 2020). Hiermee kan Douglas worden ingezet om lariks en fijnspar opstanden te verrijken en mogelijk te vervangen en gelijktijdig helpen om gemengde opstanden te creëren.

Zoals eerder benoemd is de Douglas een geïntroduceerde (exotische) soort. Het natuurlijke verspreidingsgebied van Douglas beslaat een groot deel van de westkust van Noord-Amerika, van British-Colombia tot aan California (Washington state Department of Natural Resources, z.d.).

Hierdoor zijn er grote regionale verschillen in bijvoorbeeld neerslag en temperatuur tussen de verschillende bosarealen in het verspreidingsgebied van de soort. Dit heeft geleid tot subpopulaties met aanpassingen aan het lokale klimaat. Droogtetolerantie neemt toe naarmate de populatie zich verder zuidwaarts bevindt (St Clair & Howe, 2007). Onderzoek van Zoeteman (2021) naar verschillende herkomsten in Nederland toont aan dat de productiviteit verschilt tussen herkomsten. Maar niet alleen de productiviteit maar ook de droogtetolerantie is verschillend per herkomst, waarbij de meer noordelijkere herkomsten gekenmerkt worden door hogere productiviteit en een lagere droogtetolerantie in vergelijking met zuidelijke herkomsten (Eilmann et al., 2013; St Clair & Howe, 2007). Een verklaring hiervoor kan het verschil in *timing* en lengte van het groeiseizoen zijn, waarbij droogtetolerante zuidelijkere herkomsten een



Figuur 1 Douglas met kroonbeschadiging in Grollo, Drenthe, foto P. Copini.

vervroegd en verkort groeiseizoen hebben om hinder door zomerdroogte tegen te gaan. Hier staat tegenover dat het risico op vorstschade in het voorjaar toe neemt (Howe et al., 2003). Sinds de droogtejaren 2018 tot 2020 zijn er meldingen, dat sommige douglasopstanden kroonbeschadigingen laten zien op verschillende plaatsen in Europa, zoals Frankrijk (Sergent et al., 2014) en Nederland (Paul Copini, persoonlijke communicatie, 22 februari 2023). In Nederland zijn er meldingen, dat randbomen in sommige opstanden afsterven (fig. 1). Deze verminderde kroonvitaliteit wordt echter niet in alle opstanden waargenomen. Wat de concrete oorzaak is van de verminderde vitaliteit, op welke standplaatsen Douglas in Nederland kroonschades laten zien en hoe zich die vertaalt in veranderingen in groei is niet bekend.

1.2. Wetenschappelijk kader

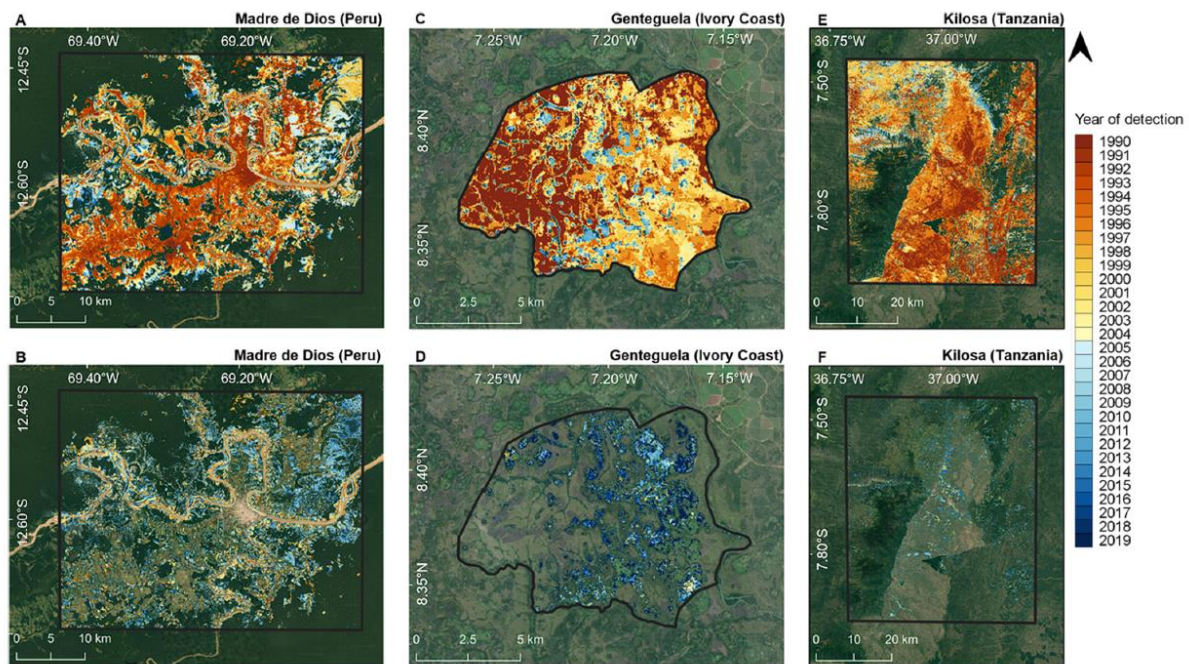
Door middel van jaarringonderzoek kan de groeidynamiek gedurende het hele leven van de boom worden onderzocht. Door het groeipatroon te koppelen aan klimaatdata wordt het mogelijk om naast het berekenen van klimaat-groeirelaties ook het effect van droogte en hittegolven op de groei van bomen te analyseren (Bose et al., 2020; Eilmann & Rigling, 2012; Seim et al., 2015). Bij de effecten van klimaatextremen wordt gekeken naar de groeireactie van een boom in het jaar waarin een droogte optreedt (*resistance*) en het herstel van groei na een dergelijk gebeurtenis (*recovery & resilience*) (Song et al. 2022; Bose et al., 2020).

Om de mate van droogte uit te drukken kan er gebruikt worden gemaakt van de *Standardised Precipitation and Evapotranspiration Index* (SPEI). Deze index beschrijft de waterbeschikbaarheid binnen een bepaalde periode en wordt bijvoorbeeld gecalculeerd uit de maandelijkse neerslag minus de maandelijkse verdamping (Beguería et al., 2014). Uit eerder jaarringonderzoek aan Douglas uit het bosreservaat Het Leesten blijkt dat Douglas een duidelijke afname van groei laat zien in droge jaren (lage SPEI) met een snel herstel in de jaren na de droogte. Dit geldt ook voor de droogte van 2018 waarbij de hersteljaren 2019 en 2020 ook gekenmerkt worden door een verminderde waterbeschikbaarheid (Stobbelaar, 2021). Over de precieze oorzaak van de verschillen in droogte tolerantie tussen verschillende Douglas opstanden in Nederland is nog geen uitsluitsel. Naast specifieke standplaatsomstandigheden, die waterbeschikbaarheid definiëren, zoals bodemtype en opbouw van het bodemprofiel zou het verschil in herkomst en mogelijke oorzaak kunnen zijn. Onderzoek van Zoeteman (2021) naar twintig douglas herkomsten, in een herkomstenproef in Sleenerzand, heeft aangetoond dat de onderzochte herkomsten hetzelfde reageren op droogte. Wel is er een verschil in groeipotentiaal tussen herkomsten gevonden. Eilmann *et al.* (2013) vonden in een vergelijkbaar onderzoek wel verschil in reactie op droogte tussen verschillende herkomsten. Een mogelijke verklaring hiervoor is het verschil in het type van onderzochte droogte, Zoeteman (2021) heeft onderzoek gedaan naar voorjaarsdroogte en Eilmann *et al.* (2013) hebben gekeken naar het effect van zomerdroogte op de groei van Douglas.

Door de ontwikkeling in satellietmonitoring kunnen veranderingen in bosopstanden steeds preciezer worden bijgehouden (Hansen et al. 2013). In Duitsland wordt *remote sensing* ingezet om de boomsoortensamenstelling in bossen te detecteren en veranderingen te monitoren (Welle et al., 2022). Andere systemen, zoals de [Waldmonitor](#) kunnen gebruikt worden om veranderingen in biomassa bij te houden (Remote Sensing Sollution & Naturwald Akademie, z.d.).

Buras et al. (2021) hebben de [European Forest Condition Monitor](#) ontwikkeld om gebieden met droogtesterfte in Europese bossen aan te tonen. De volgende stap is om ontwikkelingen van kroonvitaliteit met hoge resolutie over de tijd te monitoren. Decuyper et al. (2022) heeft hiervoor het **Anomaly Vegetation Change Detection** (hierna: AVOCADO)-algoritme ontwikkeld. Het AVOCADO-algoritme is gebaseerd op "R" package *npphen* en is bedoeld om fenotypische veranderingen, dat wil

zeggen een verandering in het kroonoppervlak, in bossen waar te nemen aan de hand van satellietdata. AVOCADO onderscheidt zich van andere monitoringsprogramma's door zijn hoge nauwkeurigheid. Hierdoor kunnen niet alleen bosverstoreningen, maar ook bosherstel worden waargenomen (fig. 2). Daarnaast werkt AVOCADO semiautomatisch; na het aanwijzen van de te monitoren gebieden en een referentie gebied kan het programma autonoom draaien. Er moet echter wel rekening worden gehouden met het feit dat AVOCADO is ontwikkeld en getest om afname van het kroonoppervlak als gevolg van kap in tropische bossen (Decuyper et al., 2022).



Figuur 2 De bovenste rij A, C en E laten het jaar zien waarin voor het eerst verstoring is waargenomen. De onderste rij B, D en F laten het eerste jaar van bos herstel zien. Overgenomen uit: Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series (p. 7) door Decuyper et al. 2022.

In eerder onderzoek van Decuyper et al. (2020) naar de mogelijkheid de groeireactie van beuk op weersextremen in Slovenië te monitoren door middel van *remote sensing*, is het mogelijk gebleken om afwijkingen en veranderingen in de vitaliteit van het bladoppervlak waar te nemen. Of het mogelijk is om afname van naalddichtheid bij Douglas waar te nemen is nog niet bekend. In de studie naar beuk is er niet voor alle jaren, met groeivermindering als gevolg van droogte, blad afname terug te zien in de satellietdata. De vraag blijft dan ook hoe verstoringen, die gedetecteerd worden in het kronen dak gekoppeld kunnen worden aan productieverlies. Het achterliggende idee is dat veranderingen in de kroonactiviteit effect hebben op de groei van bomen. De kroon en de naaldmassa is verantwoordelijk voor fotosynthese en daarmee de productie van assimilaten, dat wil zeggen de motor van de algehele boomfysiologie en de bouwstof voor de groei. Vermindering van de kroonvitaliteit kan daarom zorgen voor het vormen van minder hout wat uitdruk zou kunnen vinden in smalle jaarringen (Grieu et al., 1988). Een verstoring van het kronendak en daarmee de fotosynthese capaciteit zou dus kunnen leiden tot verminderde stamgroei. Voor Douglas zijn groeireducties in de jaren 2018 tot 2020 gevonden op verschillende plaatsen in Europa, zoals Spanje (Gazol et al. 2022) maar ook in Nederland (Copini et al. 2022). Dendrometer metingen aan Douglas

spar uit het Bosreservaat Het Leesten laten ook weer in 2022 duidelijke groeireducties zien (Bas Lerink, persoonlijke communicatie, 23 maart 2023).

1.3. Probleemanalyse

In de afgelopen jaren hebben we vaker periodes van droogte gezien. Voor een beheerder zijn de effecten hiervan binnen een opstand waar te nemen. Een individuele boom wordt dun in de kroon of valt helemaal uit. Dit houdt in dat alleen door waarnemingen op locatie, door een persoon met kennis van het gebied de effecten van droogte kunnen worden opgemerkt. Door middel van de bosinventarisatie (Schelhaas et al., 2022) kunnen langetermijneffecten op groei en mortaliteit worden gemonitord. Tot nu toe is echter een grootschalige monitoring van droogte-effecten met hoge tijdelijke en ruimtelijke resolutie in Nederlandse bosarealen niet mogelijk. Door middel van jaarringanalyse zou dit ondervangen kunnen worden. Dit vergt echter veel menskracht en tijd. Daarnaast kan het alleen met terugwerkende kracht worden toegepast. De toepassing van *remote sensing* om droogte effecten op bosopstanden te monitoren zou hier een uitkomst kunnen bieden. *Remote sensing* biedt de mogelijkheid om op landelijk niveau bosarealen in echtijd (*realtime*) te monitoren. Zo kunnen droogte-effecten en het navolgende herstel of sterfte worden waargenomen terwijl deze processen plaatsvinden, in plaats van naderhand.

In deze studie worden beide methoden, analyse van de kroontoestand met satellietbeelden en analyse van de radiale stamgroei door middel van jaarringonderzoek toegepast. Doel is om te onderzoeken of veranderingen in de kroontoestand van Douglas gedurende jaren met extreme droogte en het mogelijk daaropvolgende herstel corresponderen met veranderingen in het groeipatroon van dezelfde bomen. Dit, om (1) de informatie, die beide methodes leveren ter detectie van vitaliteitsverlies en herstel te beoordelen en te bediscuteren en (2) de toepasbaarheid van *remote sensing* als grootschalig monitoringsmiddel te onderzoeken.

Door Douglasopstanden met verschillende kroonvitaliteit ruimtelijk aan elkaar te koppelen en te vergelijken wordt er getracht een verklaring te geven voor de vitaliteitsverschillen tussen Douglasopstanden op verschillende locaties in Nederland. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van het programma AVOCADO om de kroonvitaliteit te monitoren, niet alleen ruimtelijk maar ook door de tijd. Door een koppeling te maken met jaarringonderzoek kan gekeken worden naar de relatie tussen kroonvitaliteit en radiale groeiactiviteit en daarmee ook naar de impact van droogte op de productiviteit van Douglas in verschillende opstanden in Nederland. Daarmee wordt de mogelijkheid verkent om (1) het effect van droogte op de productiviteit van Nederlandse boomsoorten middels *remote sensing*-onderzoek te detecteren en (2) de kans om veranderingen in de vitaliteit van opstanden vroegtijdig waar te nemen. Dit moet leiden tot een beter inzicht in de geschikte groeiplaatsen voor Douglas, en zo beheerders helpen keuzes te maken die aansluiten op de toekomstige uitdagingen in verband met klimaatsverandering.

Hoofdvraag:

Is er een verschil in groeidynamiek tussen Douglas opstanden met en zonder visuele kroonverlichting en kan *remote sensing* worden gebruikt voor de monitoring hier van?

Deelvragen:

1. Kan AVOCADO afname en toename in kroondichtheid detecteren in Douglasopstanden met visuele verschillen in kroonverlichting?
2. Welke klimaatfactoren beïnvloeden de langetermijns-groeidynamiek van Douglas spar op respectievelijk een standplaats met en zonder kroonverlichting? en wat was het effect van het droogtejaar 2018 op de groei en van Douglas op beide standplaatsen?

3. Komen afname en herstel in groei zoals waargenomen in jaarringonderzoek overeen met de afname en herstel van kroondichtheid zoals gedetecteerd door AVOCADO?

1.4. Doelstelling en duurzaamheid

Dit onderzoek draagt bij aan het ontwikkelen van een nieuwe en verbeterde monitoringsmethode van droogte effecten op Nederlandse bossen, specifiek voor de soort Douglas. Dit moet tot meer kennis leiden over de droogtegevoeligheid van verschillende boomsoorten groeiende onder diverse standplaatscondities. Dit is belangrijke informatie voor de beheerder om betere afwegingen te kunnen maken in het beheer en de selectie van boomsoorten voor aanplant op bestaande standplaatsen, maar ook bij de aanleg van nieuwe bossen.

De Verenigde Naties (2021) hebben 17 duurzame ontwikkelingsdoelen (SDG's) opgesteld om gelijke kansen voor iedereen te bevorderen. Hierin wordt erkend dat klimaatverandering een grote impact heeft op gemeenschappen wereldwijd. Het behouden, versterken en duurzaam gebruik van natuurlijke hulpbronnen komt dan ook in meerdere doelen naar voren. Duurzaam beheer en gebruik van natuurlijke grondstoffen, zoals benoemd in SDG 12.2, hebben een sterke relatie met de bosbouw. Hout, wanneer geoogst volgens goed beheer, is een van de meest duurzame grondstoffen. Naaldbhoutsoorten, waaronder Douglas, zijn traditioneel belangrijke bomen voor de productie van zaaghout. Klimaatverandering en de daarmee gepaard gaande droogtejaren hebben geleid tot vitaliteitsverlies bij Douglassen (Copini et al., 2022). SDG 13 benadrukt de noodzaak van maatregelen tegen de gevolgen van klimaatverandering. Door onderzoek te doen naar de impact van droogte op de groei van Douglas wordt er een bijdrage geleverd aan beide SDG's.

Het bevorderen van duurzaam gebruik en gelijktijdig beschermen en herstellen van ecosystemen is de focus van SDG 15. Het behoud, herstel en duurzaam gebruik van ecosystemen, waaronder bossen, wordt benadrukt in SDG 15.1. Het doel van SDG 15.2 is de implementatie van duurzaam beheer om bestaande bossen te revitaliseren en de aanplant van nieuwe bossen te bevorderen. Het verkrijgen van inzicht in opstanden die vitaliteitsverlies vertonen in de vorm van kroonschade, zowel ruimtelijk als temporeel, helpt bij het identificeren van de onderliggende oorzaken. Dit inzicht kan vervolgens leiden tot een betere ontwikkeling van herstelmaatregelen.

1.5. Randvoorwaarden en afbakening

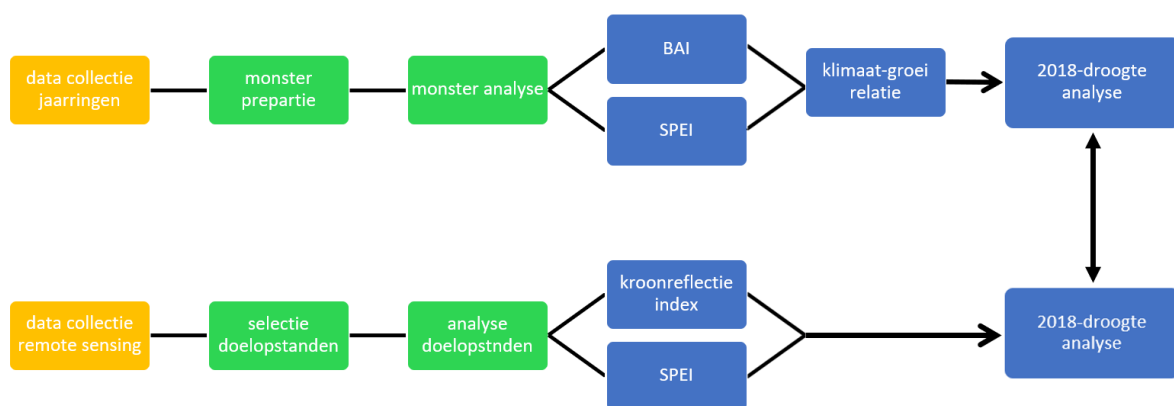
In dit onderzoek wordt ingegaan op de mogelijkheid om via *remote sensing* droogte-effecten op boomvitaliteit te kunnen monitoren. Echter, beperkt zich dit onderzoek op *remote sensing* analyses van de kroondichtheid van Douglas als gevolg van droogte. Daarnaast focust dit onderzoek alleen op droogte-effecten en navolgend herstel van de recente droogte in 2018, waarbij in de analyse de periode van 2017 tot 2022 is meegenomen. In het onderzoek wordt niet mee genomen hoe verschillende beheeringrepen en standplaatsfactoren van invloed zijn op groei en droogtereactie van de Douglas opstanden. In de analyse wordt wel rekening gehouden met het moment van uitvoering van beheer ingrepen.

2. Methode

De methode bestaat uit drie hoofdfasen, die weer bestaan uit verschillende subfasen (fig. 3 & 4). In de fase van datacollectie zijn alle benodigde gegevens voor het onderzoek verzameld. In de volgende fase “labwerk” zijn de boommonsters geprepareerd voor de laatste fase. Tijdens de data-analyse, de laatste fase van het onderzoek, is de ruwe data geanalyseerd en zijn de resultaten van de analyse geïnterpreteerd.



Figuur 3 Overzicht van de drie hoofdfasen van het onderzoek.



Figuur 4 Overzicht van de verschillende onderzoek sub fasen. De kleur van de sub fasen komen over een met die van de hoofd fasen

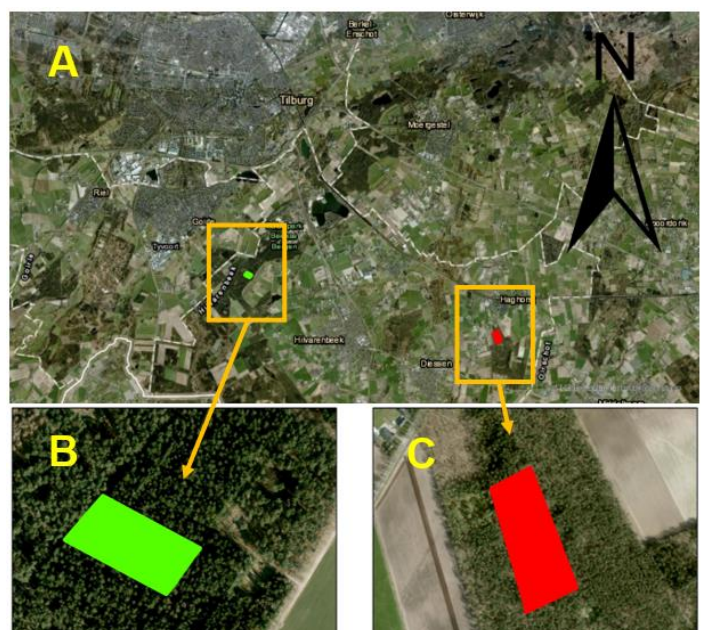
2.1. Datacollectie

Gedurende de fase van datacollectie zijn de veldmetingen uitgevoerd en zijn de meteorologische gegevens verzameld.

2.1.1. Onderzoeklocaties

De twee onderzochten opstanden liggen ten zuidwesten van Tilburg (fig. 5). De opstanden zijn door de beheerder, aan de hand van de kroondichtheid na de droogte jaren 2017 en 2018, beoordeeld als vitaal en niet-vitaal. De niet-vitale opstand bestaat voor 90% uitbomen met een lage kroondichtheid.

De vitale opstand staat op een duinvaaggrond met leemarm tot zwak lemig fijn zand. De grondwatertrap is VIId, met een gemiddeld hoogste grondwaterstand van 1,61 m onder het maaiveld. Het kiemjaar van de opstand is 1987 en de opstand is tot 2012 beheerd als



Figuur 5 Overzicht van de meetlocaties (A). Vitale opstand in groen (B) en niet-vitale opstand in rood (C).

een coulissebos met toekomstbomen selectie. Na 2012 is de overstap gemaakt naar Qualifizieren-Dimensionieren (QD) beheer en zijn de toekomstbomen volledig vrijgezet. In de winter van 2015/2016 is er een derde dunning uitgevoerd en zijn de toekomstbomen meegenomen in een steenmeelproef, bijlage 1 bevat een volledig overzicht van de opstand omschrijving.

De bomen in de niet-vitale opstand zijn met een kiemjaar van 1976 ruim 10 jaar ouder dan de bomen in de vitale opstand. Ze staan op een haarpodzolgrond met leemarm tot zwak lemig fijn zand met grondwater trap VIII. De gemiddelde hoogste grondwaterstand is 0,93 m onder maaiveld. Het beheer is uitgevoerd volgens het principe van toekomstbomen selectie, in 2014 en 2018 is er gedund. Het huidige beheer is volgens het principe van QD-beheer. Een volledige opstand omschrijving in bijlage 1.

2.1.2. Veldmetingen

Op 12 april 2023 is de vitale opstand bemonsterd en op 19 april 2013 is de niet-vitale opstand bemonsterd. In elke opstand zijn er 16 dominante bomen bemonsterd met een minimale diameter van 20 cm. In de niet-vitale opstand zijn alleen dominante bomen bemonsterd met een verminderde kroondichtheid. Van elke boom is de diameter op borsthoogte (DBH, 1.3 meter) bepaald door kruislings te meten. Vervolgens zijn er met een 5,15 mm Haglöf (Långsele, Zweden) aanwasboor van elke boom op borsthoogte twee boorkernen genomen, in dezelfde oriëntatie als de diameter metingen. De twee gebruikte aanwasboren hebben een lengte van 30 en 40 centimeter, afhankelijk van de dikte van de boom werd de korte of lange aanwasboor gebruikt. Door twee boorkernen haaks op elkaar te nemen wordt er gecorrigeerd voor variatie in jaarlijkse groeipatronen rond de stam (Song et al., 2022; Stobbelaar, 2021).

2.1.3. Meteorologische gegevens

De Meteorologische gegevens, maandelijkse verdamping, temperatuur en *Standardised Precipitation and Evaporation Index* (SPEI), zijn verkregen van het weerstation de Bilt (KNMI, z.d.). De waterbeschikbaarheid kan worden uitgedrukt over een periode van één maand (SPEI1) of over een lagere periode, bijvoorbeeld SPEI3. Ook SPEI waarden over een langere periode worden in maandelijkse waarde uitgerukt. Zo is de SPEI3 van maart een weergave van de waterbeschikbaarheid van januari, februari en maart. Er is gekozen voor het weerstation de Bilt, omdat hier alle benodigde gegevens beschikbaar zijn over de volledige tijdreeks (1966 tot 2022).

2.2. Labwerk

Het labwerk bestond uit twee subfasen; monster preparatie en monster analyse (fig. 4).

2.2.1. Monster preparatie

In het lab zijn de boorkernen verlijmd op houten houders. De boorkernen zijn met de kopse kant boven verlijmt, zoals ze uit de boom zijn genomen. De verlijmde boorkernen zijn aangesneden met een microtoom (WSL, Birmensdorf, Zwitserland) van de bast naar het centrum van de boom. Daarna is het oppervlak geschuurd met korrel 1000 schuurpapier. Dit verhoogt het contrast tussen vroeg- en laathout en resulteert in een oppervlakte waarvan de jaarring goed zichtbaar en jaarringgrenzen goed detecteerbaar zijn. Digitale afbeeldingen (1600 dpi) van de boorkernen zijn verkregen door middel van een A3 *flatbed scanner* met hoge resolutie (Epson Expression 10000 XL). De scans zijn in het programma *CooRecorder 9.0* (Cybis Elektronik & Data AB, 2020) geladen. Van elke individuele boorkern zijn alle jaarringgrenzen, gekenmerkt door een scherpe overgang in dichtheid tussen vroeghout (dunwandige tracheiden met grote lumina) en laathout (dikwandige tracheiden met kleine lumina), semiautomatisch gemarkeerd. Een visuele controle van de jaarring markeringen blijft noodzakelijk.

2.2.2. Kruisdatering

Om de kwaliteit van de jaarringreeksen te controleren zijn deze visueel gekruisdateert met behulp van het programma *TSAPwin* (Rinntech, Duitsland). Dit, door jaarring reeksen onderling te vergelijken en zo fouten te ontdekken en te corrigeren. Na de visuele kruisdatering zijn de jaarringreeksen statistisch gecontroleerd op fouten met het programma *COFECHA* (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983). Jaarringreeksen die door *COFECHA* als afwijkend werden aangegeven zijn opnieuw visueel gekruisdateert. Door middel van dit iteratieve proces zijn alle fouten in de jaarringreeksen opgespoord en verwijderd.

2.3. Statistische analyse

De statistische analysefase bestaat uit meerdere subfasen (fig. 4), de subfasen BAI, SPEI en klimaat-groeirelatie zijn uitgevoerd in het programma “R” (Posit Software, 2023) met het pakket *denDroLAB* (Buras et al., 2016).

2.3.1. Groeipatroon en jaarringanalyse

Om tot één jaarringreeks per bemonsterde boom te komen is het gemiddelde van de jaarringreeksen van de twee radii berekend. Vervolgens zijn alle jaarringreeksen per opstand samen geplot om een overzicht van de variatie in groeipatroon van alle onderzochte bomen voor de twee opstanden, vitaal en niet-vitaal te krijgen. Aan de hand van deze grafieken is af te lezen in welke jaren er een afname of toename van de jaarringbreedte plaatsvindt.

De kwaliteit van de jaarringreeksen is gecontroleerd en beschreven met verschillende statistische indicatoren: de gemiddelde correlatie tussen alle reeksen per standplaats (IC, R_{bar}), de gemeenschappelijk variatie binnen de twee boompopulaties, (*Expressed population signal* EPS), de relatie tussen gemeenschappelijk en verschillend signaal in jaarlijkse variatie in de jaarringreeksen binnen de beide boompopulaties (*signal to noise ratio*, snr), en de gemiddelde autocorrelatie binnen de twee boomcollectieven (*first order autocorrelation*, AC). Met deze statistische indicatoren kan worden vastgesteld of de middelcurves oftewel de chronologieën die uit de afzonderlijke jaarringreeksen per opstand worden berekend een goede vertegenwoordiging zijn van individuele bomen. De inter-series correlatie (IC) wordt berekend volgens het “*leave one out* principe”, waarbij de gegevens van één specifieke jaarringreeks word vergeleken met het gemiddelde van de overige 15 jaarringreeksen. De R_{bar} waarde is gebruikt om te bepalen of de bemonsterde bomen hetzelfde reageerden op externe factoren, waarbij een hogere R_{bar} waarde betekent dat er weinig variatie is in jaarringbreedte tussen bomen. EPS en SNR zijn indicatoren voor intercorrelatie tussen de jaarringreeksen van de individuele bomen, waarbij de replicatie, dat wil zeggen de hoeveelheid jaarringreeksen, die een bepaalde tijdsperiode dekken wordt meegenomen; hogere waarden geven een hogere inter-correlatie aan.

Daarna zijn de individuele jaarringreeksen, die nog individuele trends, zoals de leeftijdstrend bevatten “*detrended*” met een *spline* functie (flexibiliteit/*stiffness* 15 jaar). Vervolgens zijn de *detrended* jaarringreeksen gebruikt om de *master chronologie* per opstand te calculeren. De *master chronologie* is een weergave van de jaarlijkse groeivariaties binnen de onderzochte Douglas populaties. De keuze voor een *spline* functie van 15 jaar is gebaseerd op de *common interval* (25 en 31 jaar, bijlage 2), de flexibiliteit van de *spline* moet ongeveer de helft van de *common interval* zijn en niet kleiner dan 15 (Helama et al., 2004). Gezien de kleine *common intervals* van beide opstanden is er gekozen voor een *spline* van 15 jaar. De *common interval*, een functie binnen het “R” pakket *dpIR*, geeft een overzicht van in welke jaren de jaarring reeksen overlappen voor alle bomen binnen de dataset.

Naast de jaarringbreedte is ook de *Basal Area Increment* (hierna: BAI), dat wil zeggen de jaarlijkse toename in grondvlak, berekend. BAI geeft een goede weergave van de jaarlijkse groei, omdat deze wordt gecorrigeerd voor de toename in stamdiameter (Bunn et al., 2021). Om de BAI uit te rekenen zijn de individuele jaarringreeksen nodig en de diameter van de boom op de monsterhoogte, in dit geval gelijk aan DBH. Hiermee is de jaarlijkse toename in grondvlak, uitgedrukt in mm², weergegeven

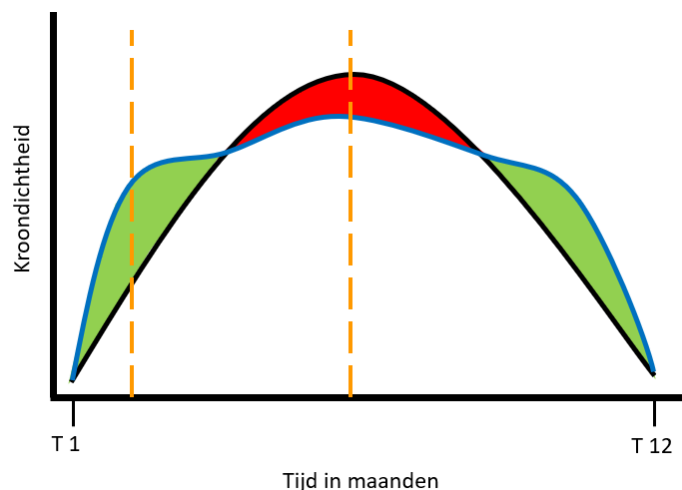
2.3.2. Klimaat-groei analyse

Om inzicht in de invloed van het klimaat op de jaarlijkse groeivariaties te krijgen is de klimaat-groeianalyse uitgevoerd. Hiervoor zijn de jaarringchronologieën van de bomen van de vitale en niet-vitale opstand gebruikt en vergeleken met de klimaatdata. De gebruikte klimaat data bestaat uit maandelijkse verdamping, temperatuur en *Standardised Precipitation and Evaporation Index* (SPEI) zoals verkregen van het KNMI weerstation de Bilt. De klimaat-groeianalyse is uitgevoerd in het *treeclim* paker in "R" (Zang & Biondi, 2015).

De maandelijkse klimaatdata is gecorreleerd met de chronologieën over de volledige leeftijdsperiode van de vitale (57 jaar) en niet-vitale (32 jaar) opstand. Daarvoor is gekeken naar de correlatie tussen chronologieën en maandelijkse klimaatvariabelen voor de periode van juni in het voorgaande groeiseizoen tot september (einde van het actuele) groeiseizoen. De correlatie is berekend binnen overlappende tijdsperiodes, met een *moving window* van 25 jaar. De klimaatdata uit het voorgaande groeiseizoen is mee genomen in de berekening, omdat deze ook van invloed kan zijn op het huidige groeiseizoen. De analyse is uitgevoerd over elk groeijaar van de bomen in de opstand, met als resultaat een correlatiematrix per opstand met daarin voor elke maand de correlatie tussen de klimaat-data en de chronologie berekend uit de bomen van respectievelijk de vitale en de niet-vitale opstand. Hierin zijn ook de significante correlaties aangegeven. Uit de correlatiematrices van de vitale en niet-vitale opstanden is afgelezen welke klimaatfactoren de groei van de bomen in beide opstanden het meest beïnvloeden gedurende de groeiperiode.

2.3.3. Remote sensing: kroondichtheid analyse

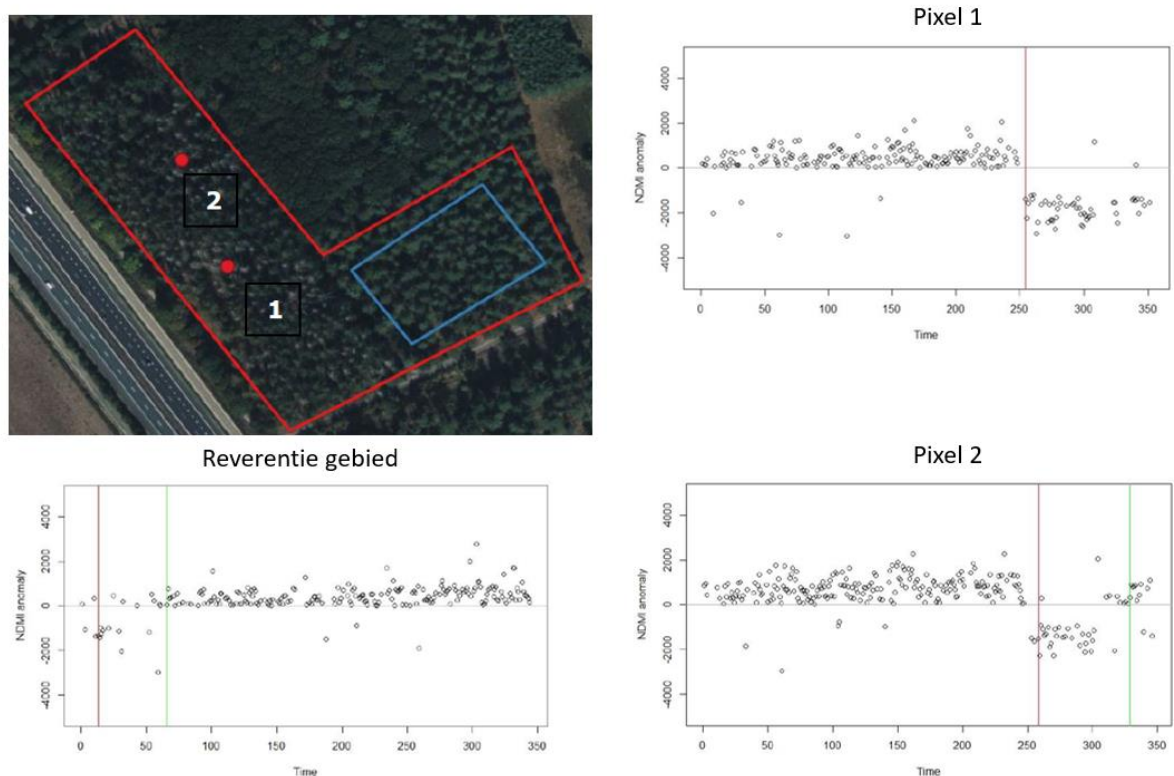
Om het verloop van de kroondichtheid door de tijd heen te bepalen wordt gebruikt gemaakt van *remote sensing* (programma AVOCADO). Een referentieopstand is gebruikt om de seizoensgebonden veranderingen in kroondichtheid te berekenen. Voor de bemonsterde bomen, die elk aan een individuele pixel zijn verbonden, is ook de verandering van kroondichtheid door de tijd heen berekend. Dit resulteert in twee grafieken, 1. de referentiegrafiek en 2. de veranderingen in kroondichtheid van de individuele boom. Het verschil tussen de twee grafieken, de afstand boven of onder de referentie grafiek, geeft de afwijking in kroondichtheid aan (fig. 6). Dit levert een getallenreeks die de toe- en afname van kroondichtheid door de tijd weergeeft.



Figuur 6 Schematische weergaven van de AVOCADO data. In zwart de referentie grafiek die de kroondichtheid over het kalenderjaar in een referentieopstand aangeeft. De In blauwe lijn geeft de verandering in een te onderzoeken opstand aan; groene vlakken markeren een hogere kroondichtheid ter opzichte van de referentieopstand en het rode vlak markeert een lagere kroondichtheid in vergelijking met de referentieopstand. Elk meetpunt (oranje stippellijn) levert een significante afwijking uitgedrukt in het verschil op de Y as.

Als een eerste *proof of concept* van AVOCADO is er een *test run* gedaan in een Douglas opstand die geen deel uit maakt van dit onderzoek (fig. 7).

Hierna zijn de bemonsterde bomen gekoppeld aan individuele pixels door middel van coördinaten. Voor elk van deze pixels is aan de hand van meerjarige satellietbeelden (2000-2022) berekend óf er afwijkende veranderingen in kroondichtheid zijn. Dit levert voor elke onderzochte boom een reeks aan afwijkingen, uitgedrukt in plus of min waarden, per datum waarop een satellietbeeld is gemaakt. Satellietdata van beelden op bewolkte dagen is niet bruikbaar in de analyse, gecombineerd met het onregelmatige overvliegen van de satellieten resulteert in verschillen in het aantal metingen per maand. Deze afwijkingen worden geplot waarbij de verstoringen (*anomalies*), dat wil zeggen sterke afwijkingen over een langere tijdsperiode, zijn gemarkeerd. Hierdoor ontstaat er een overzicht van de jaren met afname en toename in de kroondichtheid over de periode van 2000 tot 2022. Deze gegevens zijn visueel vergeleken met de opstandchronologieën om overeenkomsten tussen de *anomalies* in kroondichtheid en jaarringbreedte vast te stellen. Tot slot is de dataset van de kroondichtheidsanalyse gecorreleerd met de klimaatdata om de invloed van klimaat op kroonafname vast te stellen. Om de kroondichtheidsgegevens met de maandelijkse klimaatdata te kunnen correleren moet deze worden omgezet naar maand waarden. De maximale waarde van elke maand is gebruikt als maand waarde. De correlatie is berekend voor over de periodes 2000 tot 2022 en 2015 tot 2018.



Figuur 7 Test uitslag van AVOCADO, rood omlijnd een Douglas opstand met daarin twee meetpunten (pixels). Blauw omlijnd de referentie opstand. Pixel 1 laat in 2018 een afname in de kroondichtheid zien gemarkeerd met de rode lijn. Pixel 2 laat in 2019 een afname zien met herstel in 2022 aangegeven met de groene lijn.

3. Resultaten

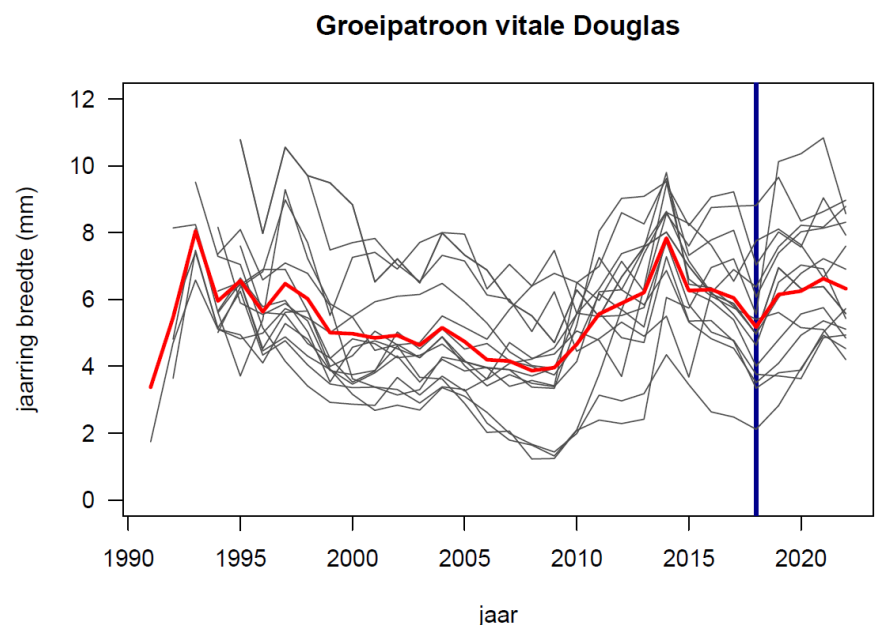
Eerst worden de resultaten van de jaarringanalyse van de 16 bemonsterde bomen in de vitale opstand (hoge kronendichtheid) en niet-vitale opstand (lagere kroondichtheid) in beide opstanden op basis van plots en statistische kenmerken beschreven. Navolgend wordt gekeken naar klimaatfactoren, die de groei van de bomen op beide standplaatsen, vitaal en niet-vitaal, beïnvloeden.

Daarna worden resultaten over het effect van de droogte in 2018 op de kroonvitaliteit zoals gedetecteerd met AVOCADO uit de satellietbeelden van beide opstanden beschreven. Daarbij wordt ingezoomd op de kroonvitaliteit van afzonderlijke bomen, die of een hoge of een lage kroondichtheid laten zien. Voor deze vitale en niet-vitale bomen worden kroonvitaliteit en jaarringpatronen visueel vergeleken.

Afsluitend worden de resultaten van de vergelijking van kroonvitaliteit en tijdelijke waterbeschikbaarheid beschreven om een mogelijk verband aan te tonen.

3.1.1. Groeipatronen van bomen in de vitale en de niet-vitale opstand

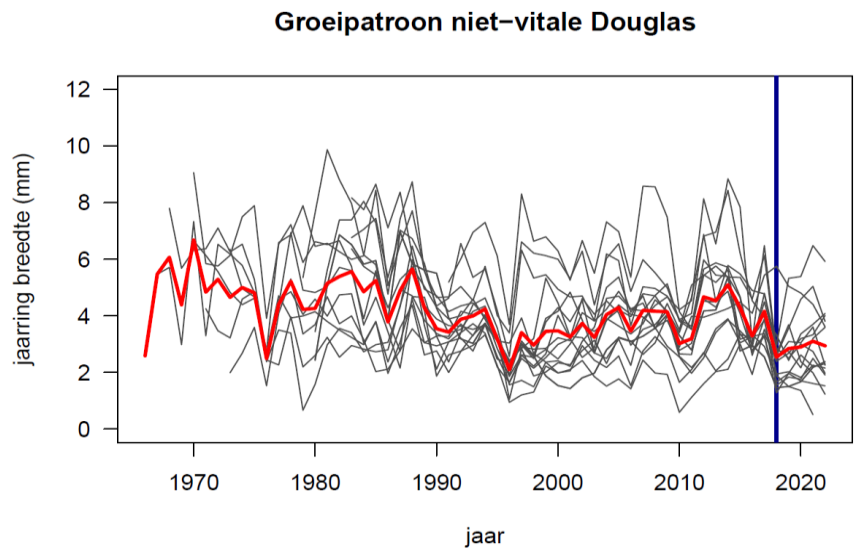
Wanneer we naar de groeipatronen van de 16 Douglas bomen in de vitale opstand kijken, zien we dat de bomen verschillen in groeiniveau, maar verder een sterke gelijkheid in het groeipatroon laten zien (fig. 8). Enkele individuen laten sterke fluctuaties in groeisnelheid zien, zowel in groeiafname als herstel. Kijkend naar het algehele groeipatroon van de opstand (de rode lijn in figuur 8) valt het volgende op. Na de snelle jeugdgroei van de eerste jaren, een geleidelijke afname te zien in de jaarringbreedte naarmate de opstand dichtgegroeid. In de winter van 2009-2010 is er een eerste dunning uitgevoerd in de opstand. Vanaf het groeiseizoen van 2010 is er een toename in jaarringbreedte te zien. Een tweede dunning is uitgevoerd in de winter van 2012-2013, hierna volgt een piek in de toename van jaarringbreedte in 2014. In 2015 is er daling in de jaarringbreedte. Hierna is de jaarringbreedte stabiel tot een daling in 2018. Met uitzondering van een boom laat de jaarringbreedte vanaf 2019 bij alle andere bomen en gemiddeld een herstel zien ten opzichte van 2018. Na 2019 blijft de jaarringbreedte gemiddeld op een hoog niveau met een lichte daling in 2022.



Figuur 8 Jaarringreeksen van 16 Douglas bomen uit de vitale opstand lopende van de 1991 tot 2022, in rood de chronologie blauw de droogte jaar 2018

Het groeipatroon van de bomen in de niet-vitale opstand (fig. 9) laat een sterke homogeniteit zien tussen de zestien individuele bomen. Wanneer er naar het groeipatroon van de opstand (rode lijn) wordt gekeken vallen er een aantal sterke afnames in de jaarringbreedte op. De duidelijkste afnames zijn in 1976 en 1996, waarbij het opvalt dat na 1976 een sterk herstel optreedt bij alle bomen. Na de

groeiafname van 1996 verloopt het herstel in jaarringbreedte gemiddeld langzamer; enkele bomen blijven ook in 1997 en 1998 langzaam groeien. In 2010 en 2011 is er een afname in de jaarringbreedte te zien. In 2012 is er niet alleen herstel maar ook een toename van de groei zichtbaar. Deze toename in jaarringbreedte zet door tot 2014, in ditzelfde jaar is er een dunning uitgevoerd. De hierop volgende jaren 2015 en 2016 laten weer een afname in jaarring breedte zien. Na een toename in 2017 is er ook in 2018 een afname van de jaarringbreedte gemiddeld en zichtbaar bij de meeste bomen. Ook in 2018 is er een dunning uitgevoerd in de opstand. De periode van 2019 tot 2021 wordt gekenmerkt door licht herstel, ondanks het herstel wordt er niet de jaarringbreedte bereikt van voor de droogteperiode. De reeks wordt afgesloten met een lichte afname in 2022.



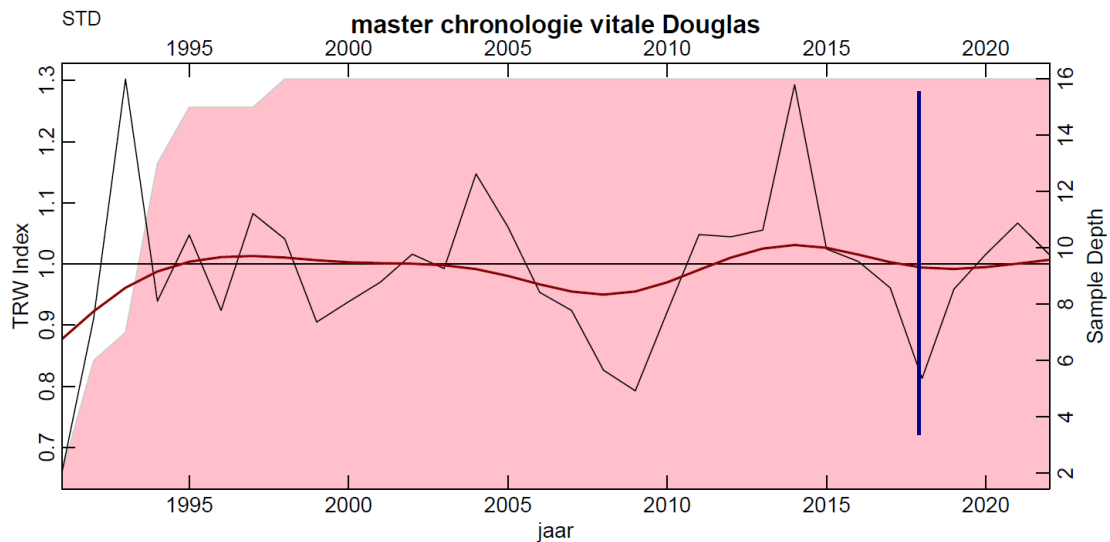
Figuur 9 Jaarringreeksen van 16 Douglas bomen uit de niet-vitale opstand lopende van de 1966 tot 2022, in rood de chronologie blauw het droogte jaar 2018.

De kwaliteit van de jaarringreeksen is statistisch gecontroleerd. Voor beide opstanden geldt dat de minimale waarde voor Rbar (0,25) en EPS (0,85) wordt overschreden (tabel 1). Ook de drempelwaarde van 0,5 voor de IC en AC worden door beide opstanden gehaald (Cook & Kairiukstis, 2013). Daaruit kan worden geconcludeerd dat de chronologieën een goede vertegenwoordiging zijn van de bemonsterde bomen.

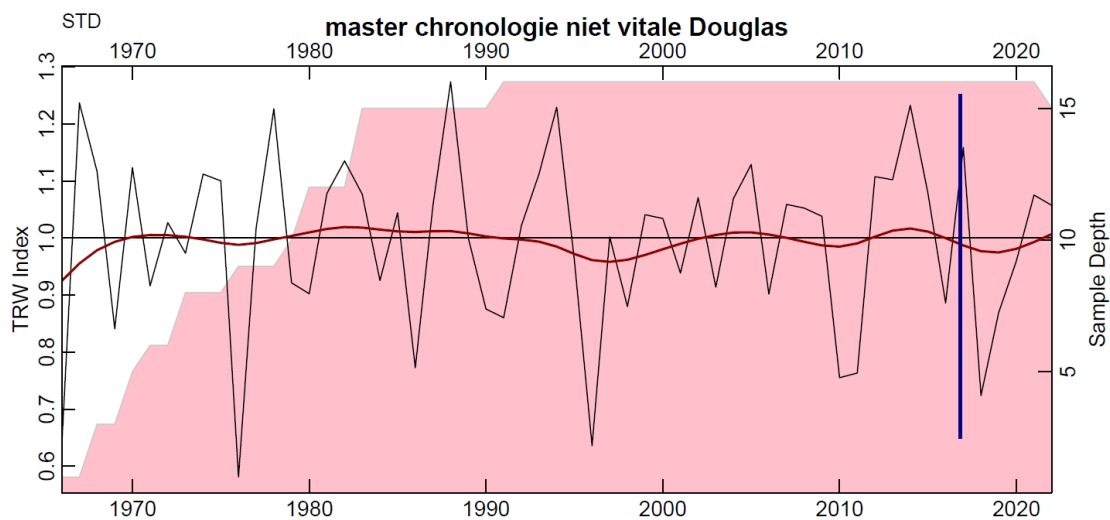
Tabel 1 De uitslagen van de statistische kwaliteitscontrole van de opstandschonologieën over de common interval. Rbar= correlatie tussen bomen, EPS= Expressed population signal, IC = inter series correlation, AC = first order autocorrelation

	Tijdreeks	Rbar	EPS	Snr	IC	AC
Vitaal	1998-2022	0,34	0,892	8,235	0.5157692	0.6781875
Niet-vitaal	1991-2022	0,403	0,915	10,796	0.6015877	0.6169375

De master chronologie van de opstanden, zoals te zien in figuur 10 en 11, zijn gecalculeerd uit de gestandaardiseerde afzonderlijke jaarringreeksen, waaruit de trend is verwijderd. In de vitale opstand (fig. 10) is er een afname in groei te zien in 2006 en een lichte afname in 2018. Wanneer we de niet-vitale opstand (fig. 11) bekijken zijn er groeiafnames te zien in 1976, 1996, 2010 en 2018. De afname in groei van 2018 komt overeen in beide opstanden.



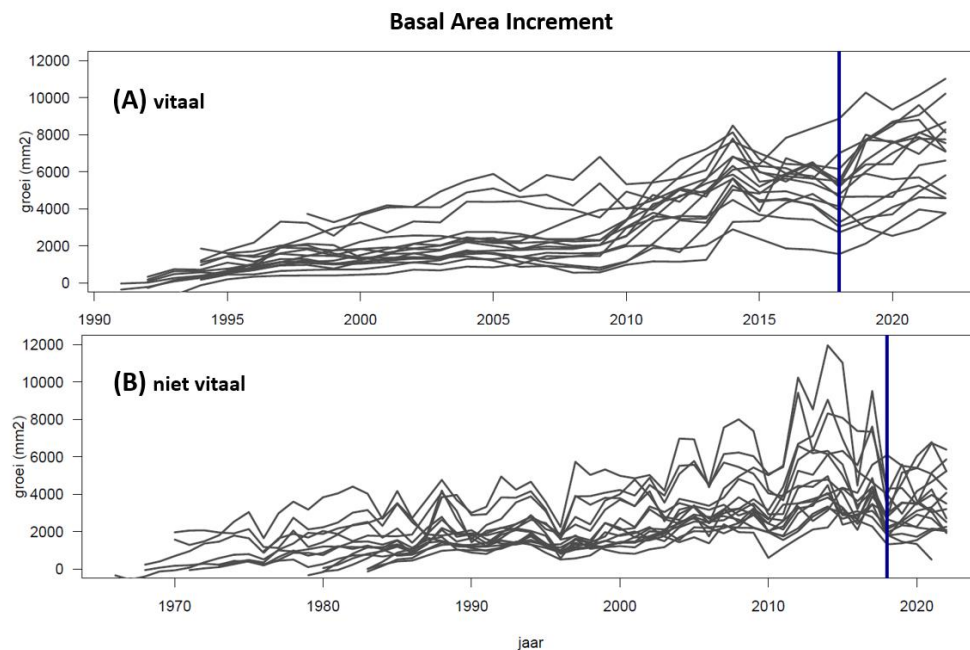
Figuur 10 Jaarring breedte index chronologie van de vitale Douglas opstand nabij Tilburg. De data is detrended door middel van een spline, aangegeven met de rode lijn, in blauw het droogte jaar 2018.



Figuur 11 Jaarring breedte (TRW) index chronologie van de niet-vitale Douglas opstand nabij Tilburg. De data is detrended door middel van een spline, aangegeven met de rode lijn, in blauw het droogte jaar 2018.

3.1.2. Basal Area Index

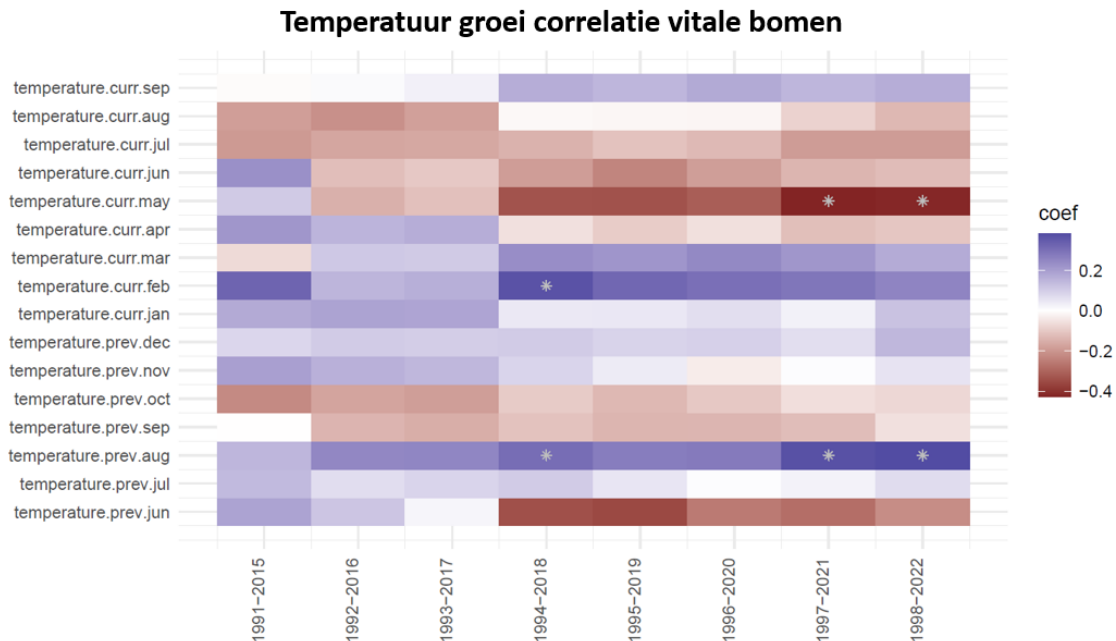
De BAI is berekend om inzicht te krijgen in het groeipatroon, gecorrigeerd voor de diameter toename van de stam. Voor beide opstanden is een geleidelijke toename in groei te zien naarmate de opstand ouder wordt. De niet-vitale opstand (fig. 12 B) laat meer groeivariaties zien vanaf een opstandleeftijd van circa twintig jaar. De vitale opstand (fig. 12 A) heeft minder groeivariaties, hierbij moet rekening worden gehouden met de jongere leeftijd van de opstand. Zowel voor de vitale als niet-vitale Douglassen geldt dat er een duidelijke groeifname is in 2018. De bomen in de niet-vitale opstand laat een sterkere afname van de groei zien dan vitale. Ook bij het groei herstel na 2018 presteert de vitale opstand beter, in 2019 is de groei al hersteld tot op het niveau van voor de droogte van 2018. Na de herstelperiode van één jaar is er jaarlijks een toename van de BAI te zien. Het herstel van de niet-vitale opstand verloopt langzamer. In 2019 is er een licht herstel in bijgroei, echter duurt het tot 2021 om op het niveau van voor 2018 te komen.



Figuur 12 De Basal Area Increment van de individuele bomen. De blauwe lijn geeft het droogtejaar 2018 aan.

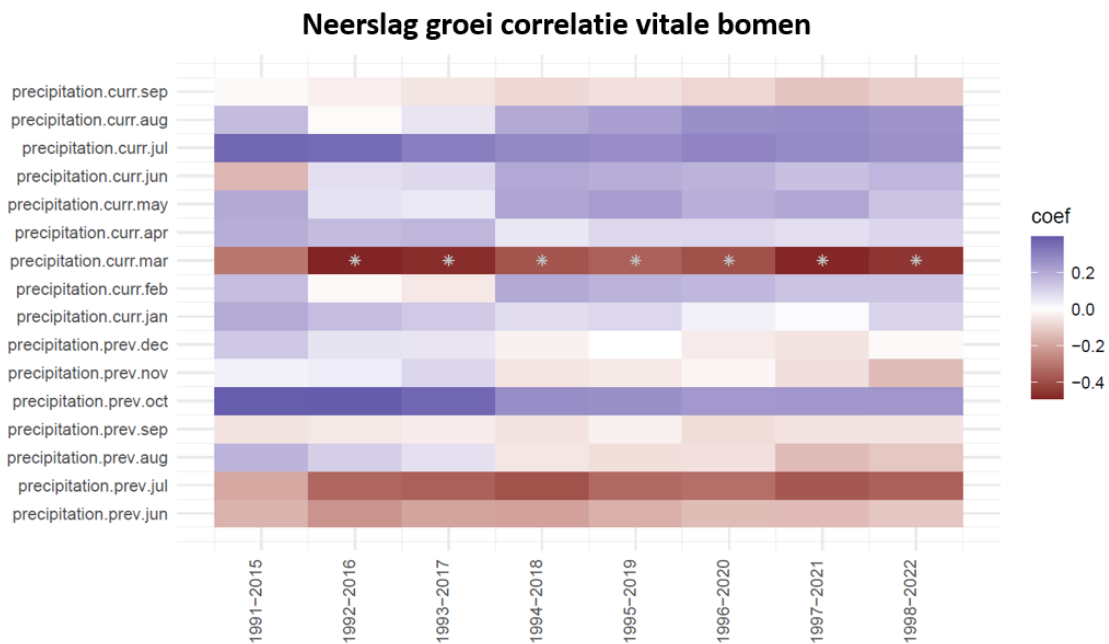
3.2. Klimaat-groeirelatie voor de vitale en niet-vitale opstand

De klimaat-groeirelatie beschrijft de relatie tussen de groei en geselecteerde klimaatfactoren. De klimaatfactoren die hier zijn meegenomen zijn gemiddelde temperatuur per maand, gemiddelde neerslag per maand en de *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*. De correlatieberekening tussen de maandelijkse gemiddelde temperatuur en de jaarringbreedte voor de vitale opstand (fig. 13) laat globaal een negatieve correlatie tussen groei en de temperaturen gedurende het groeiseizoen april- augustus) zien. Deze correlatie wordt sterker in de laatste decennia en significant voor de temperatuur in mei in de laatste 20 jaar. Dit laat zien, dat hogere gemiddelde temperaturen vooral in mei de groei van de Douglas bomen negatief beïnvloeden.. Voor augustus van het voorgaande jaar is er een significante positieve correlatie met temperatuur, hoge temperaturen in augustus van het voorgaande jaar leiden in het daarop volgende groeiseizoen tot een toename in jaarringbreedte. Gedurende de wintermaanden hebben gemiddeld hogere temperaturen een positieve invloed, echter niet significant.



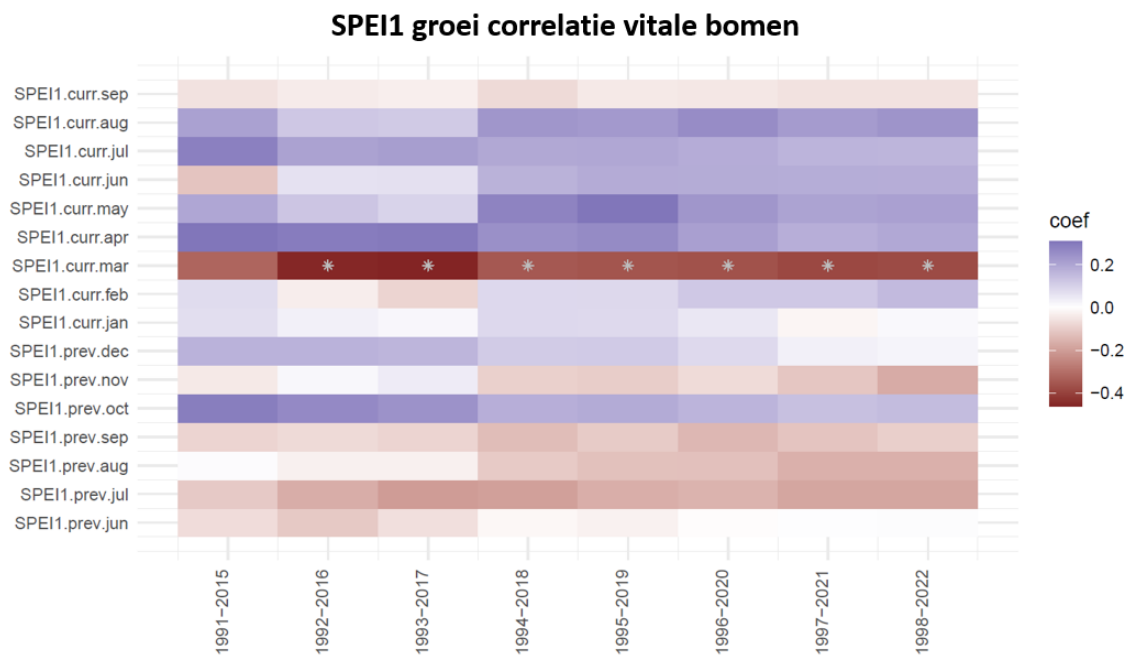
Figuur 13 Temperatuur groei correlatie voor de vitale opstand. Van september van het huidige groeiseizoen tot juni van het voorgaande groeiseizoen met een spreiding van 25 jaar.

Kijkend naar de correlatie tussen neerslag en SPEI (=waterbeschikbaarheid) en jaarringbreedte van de vitale bomen (fig. 14) zien we globaal een minder sterke relatie. Meest opvallend is de significante negatieve relatie met zowel neerslag als SPEI in maart, dat wil zeggen dat veel neerslag in maart een afname van de jaarringbreedte tot gevolg heeft. Er zijn geen andere significante correlaties gevonden voor neerslag. Wel is er te zien dat er voor de periode april tot en met augustus een niet-significante positieve correlatie is tussen neerslag en jaarringbreedte. In deze maanden is neerslag bevorderlijk voor de jaarring breedte.



Figuur 14 Neerslag groei correlatie voor de vitale opstand. Van september van het huidige groeiseizoen tot juni van het voorgaande groeiseizoen met een spreiding van 25 jaar.

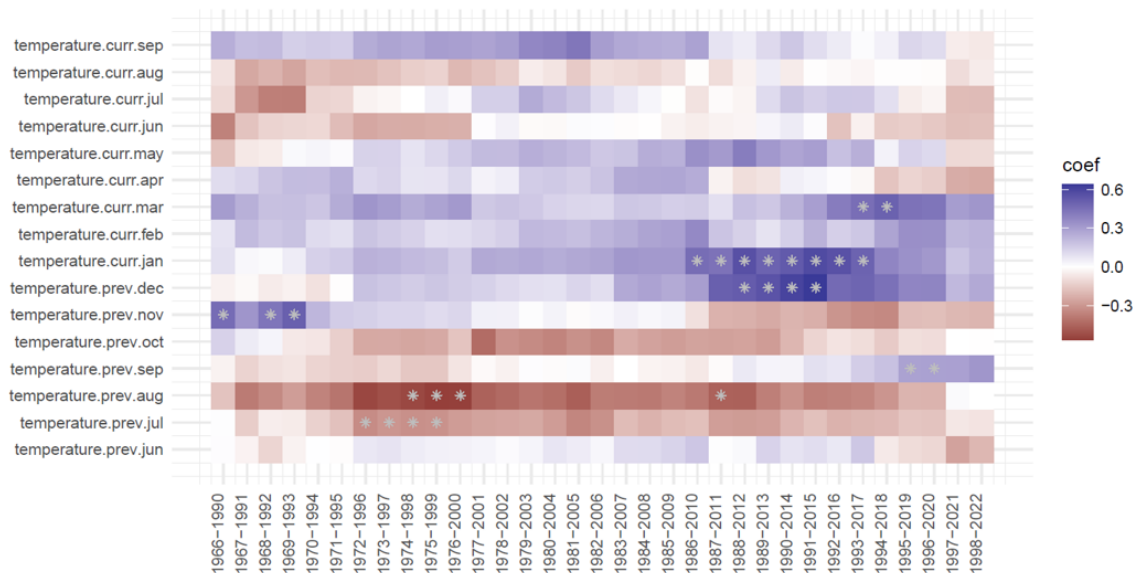
Voor de vitale bomen laat de SPEI1, waterbeschikbaarheid over een periode van één maand, een significante negatieve correlatie met de jaarringbreedte voor de maand maart van het huidige groeiseizoen zien (fig. 15). Een hoge waterbeschikbaarheid in maart resulteert in een vermindering in de jaarringbreedte. Ook hier is een niet significante positieve correlatie te zien voor de maanden april tot en met augustus, een hogere waterbeschikbaarheid in deze maanden resulteert in bredere jaarringen. Voor de periode juli-september van het voorgaande groeiseizoen is er een niet significante negatieve correlatie voor de waterbeschikbaarheid en de jaarringbreedte. Een watertekort in de periode juli, september en augustus in het voorgaande groeiseizoen heeft een verminderde jaarringbreedte tot gevolg.



Figuur 15 Waterbeschikbaarheid per maand (SPEI1) groei correlatie voor de vitale opstand. Voor de maanden september van het huidige groeiseizoen tot juni van het voorgaande groeiseizoen

De correlatieberekening van de maandelijkse gemiddelde temperatuur en de jaarringbreedte van de niet-vitale bomen laat een positieve correlatie zien met de winter- en voorjaarstemperaturen met significante waarden in januari en december (fig. 16). Hogere temperaturen in deze maanden hebben bredere jaarringen tot gevolg. De maanden juli en augustus van het voorgaande groeiseizoen hebben een significante negatieve correlatie met de gemiddelde groei van de vitale bomen. Hogere temperaturen in deze maanden heeft een afname in jaarringbreedte in het volgende groeiseizoen tot gevolg.

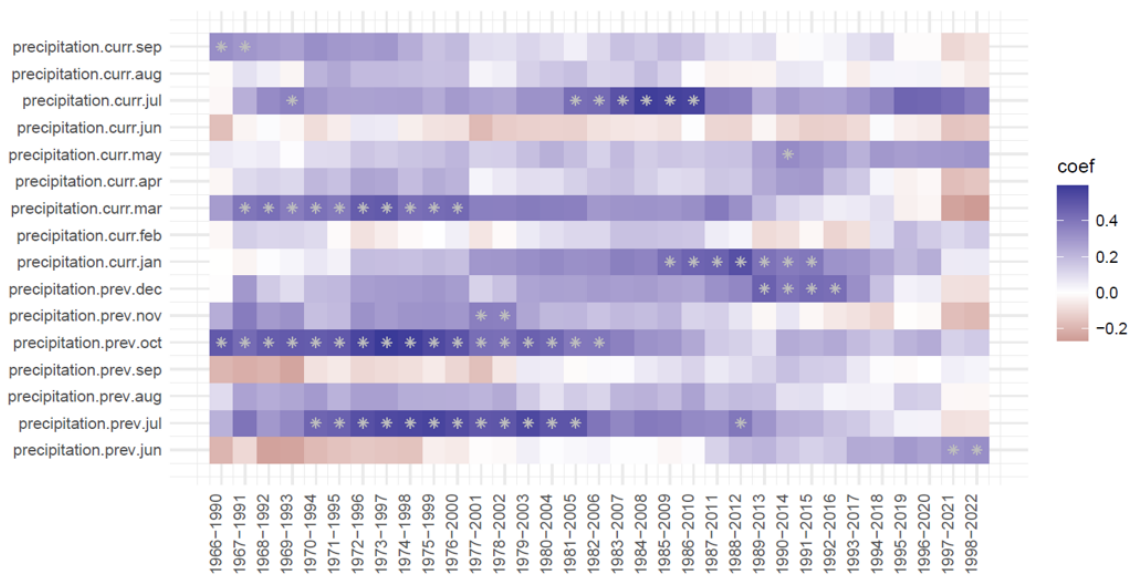
Temperatuur groei correlatie niet vitale bomen



Figuur 16 Temperatuur groei correlatie voor de niet-vitale opstand. Van september van het huidige groeiseizoen tot juni van het voorgaande groeiseizoen met een spreiding van 25 jaar.

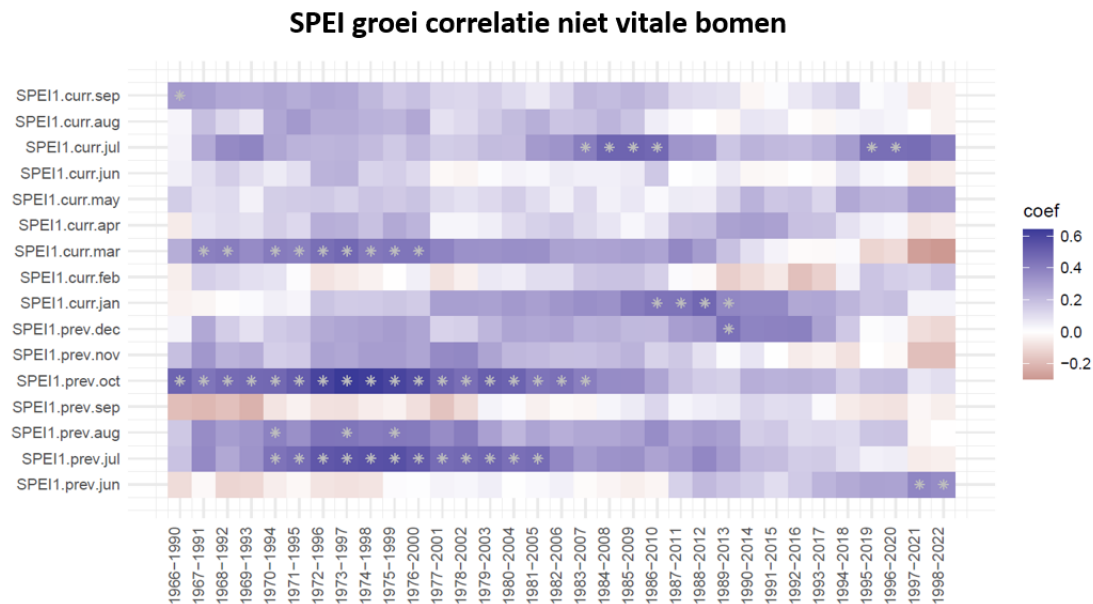
Kijkend naar de correlatie tussen neerslag en SPEI en de jaarringbreedte van de niet-vitale bomen (fig. 17) zien we over de hele periode een significante positieve correlatie met significante waarden voor de maanden januari, februari, maart en juli van het actuele jaar en juli, oktober en december van het voorgaande jaar, in alle deze maanden zorgt meer neerslag voor een bredere jaarringgroei. Deze positieve relatie is duidelijk sterker dan bij de bomen van de vitale opstand.

Neerslag groei correlatie niet vitale bomen



Figuur 17 Neerslag groei correlatie voor de niet-vitale opstand. Van september van het huidige groeiseizoen tot juni van het voorgaande groeiseizoen met een spreiding van 25 jaar.

Voor de niet-vitale bomen laat de SPEI1 (fig. 18), waterbeschikbaarheid over een periode van één maand, een vergelijkbare correlaties zien als de neerslag. Voor de maanden januari, februari, maart en juli van het huidige groeiseizoen en juli, augustus, oktober en december van het voorgaande groeiseizoen is er een significante positieve correlatie met de waterbeschikbaarheid. Een hogere waterbeschikbaarheid heeft een positief effect op de jaarringbreedte. Voor de andere maanden valt op dat deze voornamelijk een positieve correlatie tussen waterbeschikbaarheid en jaarringbreedte laten zien.

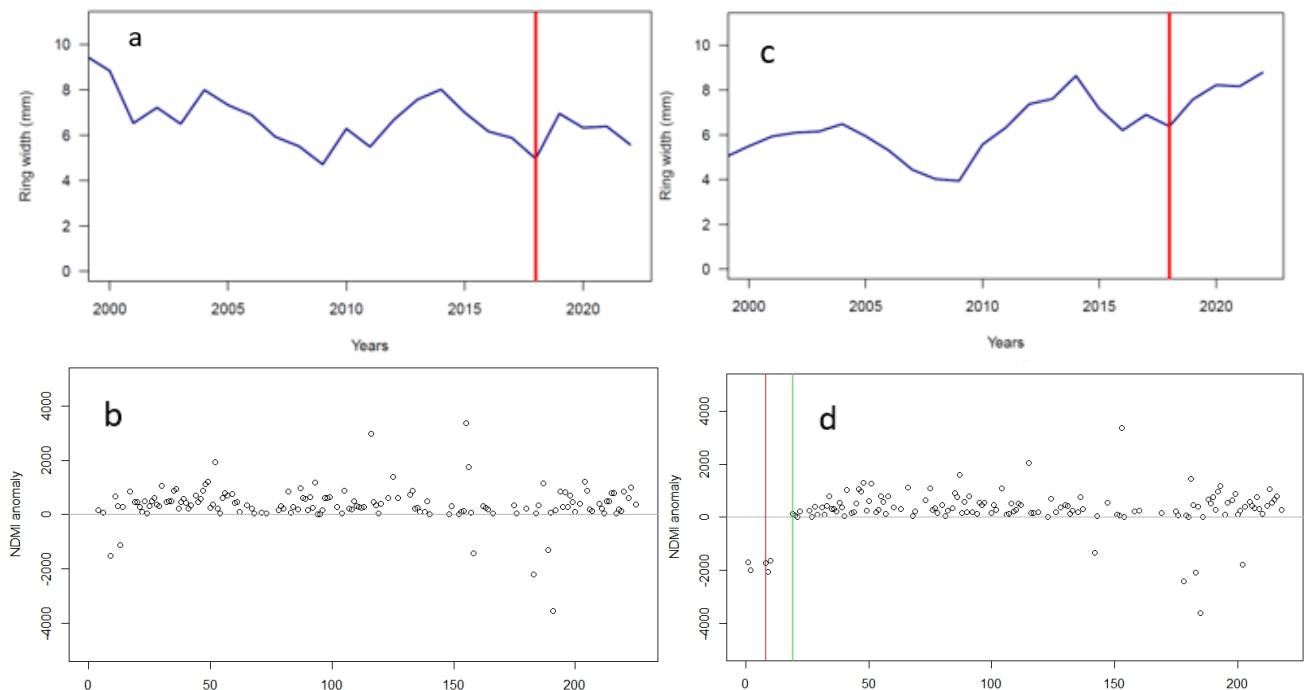


Figuur 18 Waterbeschikbaarheid per maand (SPEI1) groei correlatie voor de niet-vitale opstand. Van september van het huidige groeiseizoen tot juni van het voorgaande groeiseizoen met een spreiding van 25 jaar.

3.3. Droogte 2018 - Vergelijking kroonvitaliteit en jaarringbreedte

De analyse van de kroonvitaliteit via *remote sensing* is uitgevoerd over de periode van 2000 tot 2022. Per individuele boom is het jaarringpatroon vergeleken met de kroonvitaliteitsdata zoals geanalyseerd door AVOCADO. Voor deze vergelijking is er gekeken naar twee vitale bomen (boom 13 & 16) en vier niet-vitale bomen (2, 7, 11 & 12).

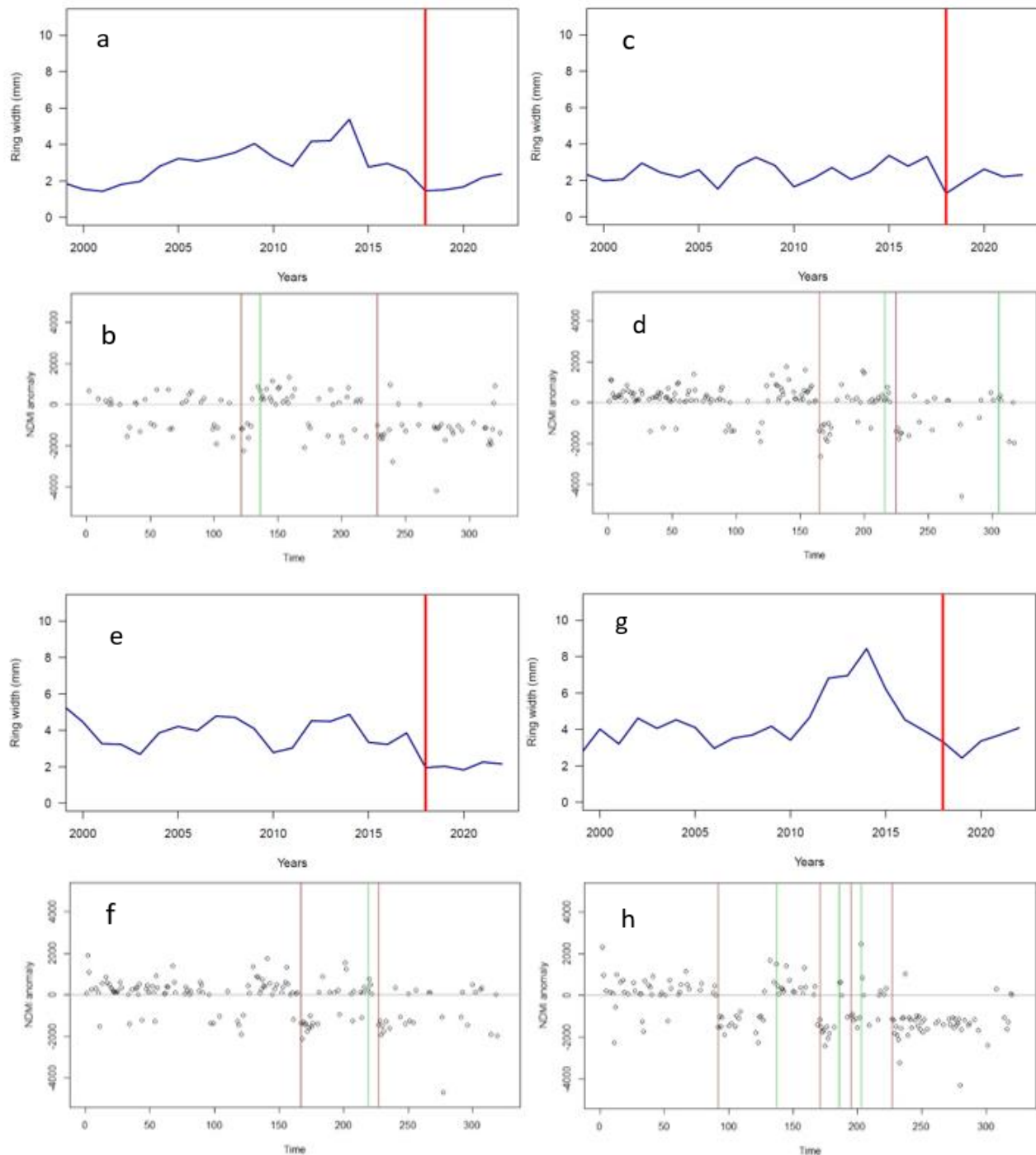
Het jaarringpatroon van vitale boom 13 (fig. 19a) laat een kleine afname van de jaarringbreedte zien in 2018 er opzichte van vorige jaren met een spontaan herstel in 2019. De kroondichtheid van boom 13 (fig. 19b) toont geen verstoring in 2018. Ook bij de vitale boom 16 (fig. 19c) is er een minimale afname in jaarringbreedte zichtbaar gevolgd door een periode met toenemende groei van 2019 tot en met 2022. AVOCADO laat voor beide vitale bomen geen duidelijke reductie in kroonvitaliteit zien. Wel is er voor boom 16 een reductie in kroonvitaliteit in 2001 gedetecteerd gevolgd door een herstel in 2002. verstoring in 2001 en 2002 respectievelijk een afname en toename van de kroondichtheid gedetecteerd voor boom 16 (fig. 19d), die niet correspondeert met een reactie in het groeipatroon.



Figuur 19 Jaarringpatronen van bomen 13 (a) en 16 (c) uit de vitale opstand, de rode lijn geeft het droogte jaar 2018 weer. De kroondichtheid afwijkingen (waarschijnlijkheids interval 85) van de bomen 13 (b) en 16 (d), de verticale lijnen geven een verstoring in kroondichtheid aan (rood een afname en groen een toename); let op! de tijdas van de NDMI AVOCADO data (b, d) is niet lineair en correspondeert niet met de tijdas van de jaarringmeringen (a, c).

Vergelijking van AVOCADO kroonvitaliteitsanalyses en jaarringanalyses van de niet-vitale opstand worden besproken aan de hand van vier bomen (fig. 20). De afname in jaarringbreedte van 2018 van de niet-vitale boom 2 (fig. 20a) komt overeen met de verstoring in kroondichtheid van 2018 (fig. 20b). Ook de waargenomen verstoringen in 2011 en het herstel in 2013 komen overeen met de afname in 2010 en 2011 en toename in 2012 en 2013 van jaarringbreedte. Boom 7 uit de niet-vitale opstand (fig. 20c en d) heeft in 2018 een afname in jaarringbreedte en een negatieve afwijking in de kroonvitaliteit. In 2015 is er ook een negatieve afwijking van kroonvitaliteit gedetecteerd door AVOCADO met een herstel in 2017 die niet correspondeert met een gelijktijdige afname en toename in jaarringbreedte. De verstoringen in kroondichtheid van niet-vitale boom 11 laten in 2015 en 2018 een afname in kroondichtheid zien, voor de afname van 2018 is er herstel waargenomen (fig. 20e). In

het jaarringpatroon (fig. 20f) is zowel in 2015 als 2018 een afname van jaarringbreedte te zien. Als laatste wordt het jaarringpatroon en e kroondichtheid van de niet vitale boom 12 vergeleken (fig.20 g en h). In het jaarring patroon zijn afnames in de breedte zichtbaar in 2015 en 2018. Deze komen overeen met de afname in kroondichtheid van 2015 en 2018. De overige verstoringen zijn in 2009, 2013, 2016 (2x), en 2017. Waar van er in 2009 en 2013 ook droogte periode in het groeiseizoen zijn geweest.



Figuur 20 Jaarringpatronen van bomen 2 (a), 7 (c) 11 (e) en 12 (g) uit de non vitale opstand, de rode lijn geeft het droogte jaar 2018 weer. De kroondichtheid afwijkingen (waarschijnlijkheids interval 85) van de bomen 2 (b), 7 (d) 11 (f) en 12 (h), de verticale lijnen geven een verstoring in kroondichtheid aan (rood een afname en groen een toename); let op! de tijdas van de NDMI AVOCADO data (b, d) is niet lineair en correspondeert niet met de tijdas van de jaarringmeringen (a,c).

Als laatste onderdeel van de kroonvitaliteitsanalyse zijn de maandelijkse waarden van de kroonvitaliteit, zoals berekend met AVOCADO gecorreleerd met de corresponderende klimaatdata. De correlaties zijn uitgevoerd over de gehele tijd reeks van 2000 tot en met 2022 en voor de periode 2015 tot en met 2018. De periode 2015 – 2018 is gekozen aan de hand van de overeenkomsten in het patroon van de jaarringen, kroondichtheid zoals besproken in boven staande alinea en de overeenkomst tussen het jaarringpatroon en de SPEI1 (fig. 21).

De kroonvitaliteit van de vitale opstand correleert, in de periode 2000 – 2022, niet significant met de tijdsgelijke klimaatdata (tabel 2). Voor de periode 2015 – 2018 zijn er wel significante correlaties tussen de kroonvitaliteit en klimaatdata (tabel 2). Er is onder andere een significante positieve correlatie tussen kroonvitaliteit en waterbeschikbaarheid over een periode van één maand (SPEI1), $r(36) = 0,458$, $p = 0,004$ en kroondichtheid en neerslag, $r(36) = 0,363$, $p = 0,027$. Voor gemiddelde temperatuur laten de resultaten een negatieve correlatie zien, $r(36) = -0,427$, $p = 0,008$.

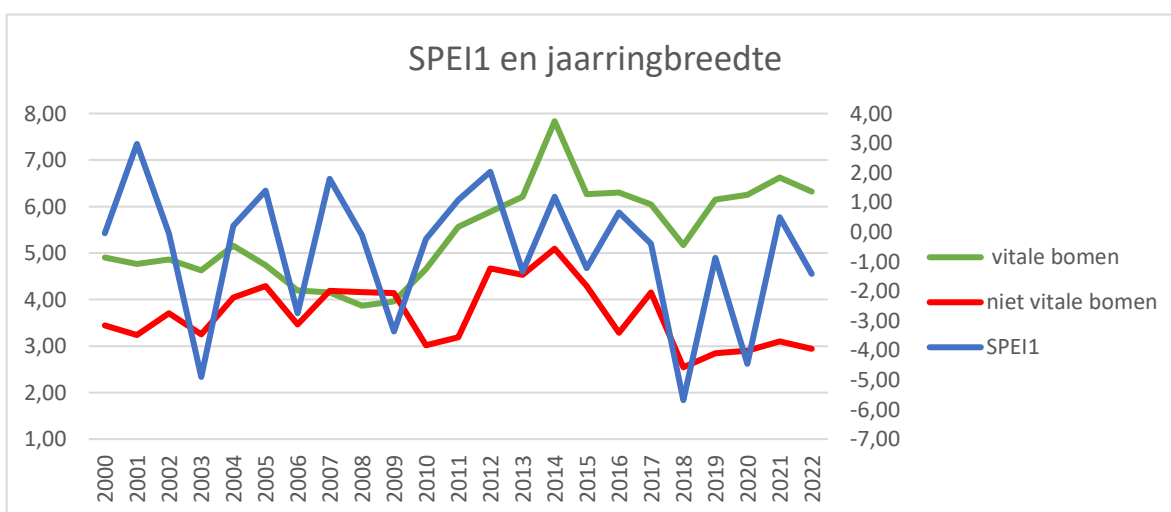
De niet-vitale opstand heeft zowel in de periode van 2000 – 2022 als 2015 – 2018 significante correlaties tussen de kroonvitaliteit en de klimaatdata (tabel 3). Kroonvitaliteit heeft in de periode 2000 – 2022 een significante positieve correlatie met de waterbeschikbaarheid over een periode van zes maanden (SPEI 6), $r(178) = 0,198$, $p = 0,008$. Voor de periode van 2015 – 2022 is er een significante positieve correlatie met de waterbeschikbaarheid over een periode van één maand (SPEI1), $r(38) = -0,319$, $p = 0,048$.

Tabel 2 2000-2022 $df=151$, 2015-2018 $df=36$ $P<0,05$ gemarkeerd in blauw $P<0,01$ gemarkeerd in groen.

	Vitaal	SPEI1	SPEI2	SPEI3	SPEI4	SPEI5	SPEI6	T gem	T max	T min	neerslag
2000/	Pearson's r	0,133	0,000	-0,014	-0,036	-0,012	0,032	-0,065	-0,070	-0,057	0,100
2022	p-value	0,103	0,999	0,866	0,662	0,886	0,692	0,526	0,393	0,486	0,221
2015/	Pearson's r	0,458	0,203	0,375	0,349	0,312	0,302	-0,427	-0,435	-0,419	0,363
2018	p-value	0,004	0,229	0,022	0,034	0,06	0,069	0,008	0,007	0,01	0,027

Tabel 3 2000-2022 $df=178$, 2015-2018 $df=38$ $P<0,05$ gemarkeerd in blauw.

	Niet-vitaal	SPEI1	SPEI2	SPEI3	SPEI4	SPEI5	SPEI6	T gem	T max	T min	neerslag
2000/	Pearson's r	0,113	0,089	0,128	0,146	0,177	0,198	-0,016	-0,011	-0,014	0,022
2022	p-value	0,13	0,238	0,088	0,051	0,018	0,008	0,835	0,883	0,849	0,774
2015/	Pearson's r	0,319	0,288	0,263	0,371	0,281	0,286	-0,185	-0,172	-0,185	0,218
2018	p-value	0,048	0,076	0,105	0,02	0,084	0,077	0,259	0,294	0,258	0,182



Figuur 21 Jaarringpatroon van de vitale en niet-vitale opstand. En de SPEI1 voor het groeiseizoen (april tot september).

Discussie

In dit onderzoek is de toepasbaarheid van satellietmetingen en navolgende data-analyse met AVOCADO om de effecten van droogte op de kroonvitaliteit van Douglas te monitoren getest. Dit is gedaan door te kijken naar bomen in vitale bossen, zonder duidelijk visuele kroonverlichting en in niet-vitale bossen met bomen, die visueel duidelijke kroonverlichtingen laten zien. In deze twee bossen is onderzocht hoe opvallende reducties in de kroonvitaliteit en mogelijke navolgende herstel zoals aangetoond door AVOCADO corresponderen met tijdelijke veranderingen in de jaarringbreedte.

Parallele afname in kroonvitaliteit en jaarringbreedte in 2018 bij niet-vitale bomen

De resultaten van de kroonvitaliteitsanalyse tonen aan dat AVOCADO in staat is om verstoringen in het kronendak waar te nemen. In deze studie aan Douglas werden - zoals verwacht - veranderingen in kroonvitaliteit voornamelijk waargenomen in de niet-vitale opstand. Alle vier onderzochte niet-vitale bomen vertonen veranderingen in kroonvitaliteit in zowel 2015 als 2018. Gedurende beide jaren was de waterbeschikbaarheid (SPEI1) laag. Alle in deze jaren door AVOCADO gedetecteerde veranderingen in kroonvitaliteit komen overeen met afname in jaarringbreedte in hetzelfde jaar. Andere door AVOCADO gevonden reducties in kroonvitaliteit in eerdere jaren in niet-vitale bomen correspondeerden niet met de vorming van smallere jaarringen.

Bij de twee vitale bomen is geen afname in kroonvitaliteit waargenomen in het droogte jaar 2018, wel is er een duidelijke afname in jaarringbreedte zichtbaar. De Decuyper et al. (2020) constateerde dat niet elke groeivermindering als gevolg van droogte een direct effect heeft op de kroonvitaliteit. Het uitblijven van een waarneming in afname van kroonvitaliteit in de vitale opstand mag echter niet geïnterpreteerd worden als het uitblijven van kroondichtheidsvermindering. Een andere verklaring voor het uitblijven van verstoringen in de vitale opstand is dat de afname van kroondichtheid in de vitale opstand te klein is om door AVOCADO te worden gedetecteerd. Het is namelijk niet bekend wat de nauwkeurigheid van AVOCADO is in het detecteren van kroondichtheid veranderingen.

Voor dit onderzoek zijn jaarringreeksen gebruikt van twee bosopstanden met ieder 16 bemonsterde bomen. De jaarringpatronen zijn statistisch van voldoende kwaliteit gebleken. Dit houdt in dat de dataset ondanks het kleine formaat geschikt is voor gebruik in deze studie.

In beide opstanden zijn in de onderzochte periode dunningen uitgevoerd. Deze dunningen zijn niet terug te zien als een verstoring in de AVOCADO-waarden. Dit betekent dat het analyseren van de kroondichtheid van een boom op pixel niveau nauwkeurig genoeg is om verstoringen door beheeringrepen uit te sluiten. Bij deze methode is de GPS locatie van elke boom nodig om de juiste pixel aan de boom te kunnen koppelen. Het verkrijgen van de GPS locatie van elke afzonderlijke boom in een bos is niet realistisch. Voor het opschalen naar bos niveau kan vlak dekkende data worden gebruikt, dus alle in plaats van individuele pixels. Het nadeel hiervan is dat verstoringen van beheeringrepen niet meer op voorhand zijn uitgesloten. Een methode om kroonafname als gevolg van beheeringrepen te onderscheiden van natuurlijke kroonafname moet nog onderzocht worden.

Ondanks dat de vitale en niet-vitale bomen overeenkomsten vertonen in hun jaarringpatronen, beide laten smalle jaarringen in 2015 en 2018 zien, is de mate van reactie verschillend. De vitale bomen laten alleen in het jaar 2015 een afname van groei zien, bij de niet-vitale bomen zet de groeiafname door tot in 2016. Dit kan er op wijzen dat de niet-vitale bomen een sterkere en langdurig negatieve reactie op de droogte van 2015 laten zien. Een andere verklaring kan zijn dat er een dunning is uitgevoerd in de vitale opstand in de winter van 2015 – 2016. Eerdere dunningen in de vitale opstand hebben een toename van jaarringbreedte tot gevolg gehad. Het positieve effect van de dunning zou het negatieve effect van de droogte kunnen opheffen, met een stabilisering van de jaarringbreedte in

2016 tot gevolg. Onderzoeken naar dunningen als klimaatslimme beheeringreep in Nederland (Toussaint, 2021) en de Verenigde Staten (Elfstrom & Powers, 2023) hebben aangetoond dat in de eerste jaren na een dunning droogte een verminderd effect heeft op de groei. Dit kan worden veroorzaakt door een vergroting van de waterbeschikbaarheid voor vrijgestelde bomen, wat het effect van watertekorten zou kunnen verlagen.

Een ander verschil in het jaarringpatroon tussen de vitale en niet-vitale Douglas opstanden is de mate van het groeiherstel na droogte. Na de door de droogte in 2018 veroorzaakte groeifname herstelde de groei van de vier niet-vitale bomen minder snel. Dit ondanks de in 2018 uitgevoerde dunning. De groeireactie van de twee opstanden op droogte verschilt in hevigheid. De verandering in groei, gemeten aan de hand van de BAI, bevestigt dit patroon. De niet-vitale opstand reageerde sterker op de droogte van 2018 en herstelde langzamer. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de afname in kroondichtheid. De afname in vitaliteit en oppervlak van de naalden heeft een vermindering van het assimilerend vermogen tot gevolg waardoor minder suikers voor stamgroei beschikbaar zijn (Grieu et al., 1988).

Nu rijst de vraag of de sterkere reactie in groeivermindering bij de niet-vitale opstand wordt veroorzaakt door een intensere droogtestress (groter watertekort) of door het verlies van naalden en de daarmee gepaarde vermindering van de fotosynthesecapaciteit.

Meer waterbehoefte voor goede groei van Douglas in de niet-vitale opstand

De resultaten van de klimaat-groei analyse laat vergelijkbare patronen maar ook verschillen zien voor de bomen in de vitale en niet vitale opstand. Voor beide Douglas opstanden zijn warme en natte condities gedurende de winter voordelig voor de groei in het navolgende groeiseizoen.

Eerder onderzoek van Stobbelaar (2021) naar het effect van droogte op Douglas in Nederland vond een vergelijkbaar resultaat. Ook onderzoek van Song et al. (2021) heeft een significante positieve correlatie tussen winter temperatuur en jaarringbreedte aangetoond voor Douglas.

Douglas in de niet-vitale opstand vertoont gedurende het hele groeiseizoen, evenals het vorige groeiseizoen, een grotere waterbehoefte (precip & SPEI) (fig. 17 & 18). Hiervoor is geen eenduidige verklaring. Een mogelijke verklaring kan zijn dat de bodem van deze opstand een lagere waterhoudende capaciteit heeft, of dat de oudere, en daarmee grotere bomen een hogere waterbehoefte hebben. Dit suggereert dat de gevonden verschillen in droogterespons tussen de vitale en niet-vitale opstand worden beïnvloed door de verschillen in opstandseigenschappen.

Kroonvitaliteit van niet-vitale Douglas gelinkt aan waterbeschikbaarheid

Waterbeschikbaarheid en kroonvitaliteit dichtheid laten globaal een minder sterk verband zien dan aangetoond voor de jaarringbreedte. Interessant is echter dat de kroonvitaliteit van niet-vitale bomen significant correleert met de waterbeschikbaarheid (SPEI 5 en 6). Dit kan wijzen op een cumulatief effect van gemiddeld lagere waterbeschikbaarheid gedurende opeenvolgende maanden voor de kroonvitaliteit. De kroonvitaliteit van de vitale opstand correleert niet met de klimaatdata, dit was ook verwacht gezien het afwezigheid van duidelijk reducties in kroonvitaliteit zoals aangetoond door AVOCADO.

In de niet-vitale opstand zijn gedurende meerdere jaren afnames in kroonvitaliteit gedetecteerd. De afnames van 2015 en 2018 zijn in alle niet-vitale bomen terug te zien, en gaan gepaard met een afname van jaarringbreedte veroorzaakt door droogte in hetzelfde jaar. In de andere jaren wordt de afname iedere keer bij een andere boom vastgesteld. Deze individuele afwijkingen in de kroonvitaliteit gaan gepaard met een algemene vermindering van jaarringbreedte en een verminderde waterbeschikbaarheid (fig 19). Het feit dat de afname van de kroonvitaliteit alleen

wordt waargenomen bij individuele bomen kan duiden op een lichte droogte, waarbij alleen de zwakkere individuen minder kroonvitaliteit waarschijnlijk gepaard met (inmiddels duidelijk zichtbaar) naaldverlies laten zien.

De droogte en de daaropvolgende groeivermindering in 2015 en 2018 geven niet alleen een verminderde kroonvitaliteit aan maar hebben duidelijk invloed op de kroondichtheid van alle niet-vitale bomen. Uit ons onderzoek blijkt dat met name de droogteperiode in 2018 het meest intens was binnen de onderzochte periode. Deze bevindingen suggereren dat de mate van droogtestress niet alleen zichtbaar is in de afname van kroonvitaliteit, maar ook in de omvang van bomen die hierdoor worden beïnvloed. Een algemene afname van kroondichtheid bij veel bomen in de opstand duidt op gevoeligheid voor droogte bij de bomen in deze opstand.

Bijdrage aan duurzaam bosbeheer

Een kroonvitaliteitsanalyse, zoals uitgevoerd met AVOCADO, kan zowel positieve als negatieve veranderingen in vitaliteit detecteren. Dit biedt de mogelijkheid om het effect van beheersmaatregelen op de droogtebestendigheid van bossen te onderzoeken. Door terug te kunnen kijken in de tijd, waarbij gebruik wordt gemaakt van bestaande satellietdatabases, kunnen niet alleen toekomstige beheersmaatregelen worden onderzocht, maar kunnen ook eerdere maatregelen worden geanalyseerd. Bovendien biedt het monitoren en verkrijgen van inzicht in de vooruitgang en achteruitgang van kroonvitaliteit in bosopstanden waardevolle informatie. Door een duidelijk beeld te hebben van welke bosopstanden achteruitgaan in kroonvitaliteit, kunnen doelgerichte revitaliseringsmaatregelen worden genomen. Deze twee mogelijke toepassingen van kroonvitaliteitsanalyse dragen bij aan het herstel en behoud van bossen (SDG 15) en zorgen voor duurzame houtproductie (SDG 12).

Conclusie

AVOCADO kan worden gebruikt om veranderingen in kroonvitaliteit en mogelijk navolgend herstel te monitoren bij Douglas. De gevoeligheid van de AVOCADO metingen, oftewel de minimale waarneembare verandering, is nog niet bekend. Tijdens en direct na een droogteperiode kan AVOCADO worden ingezet om afname in kroonvitaliteit te detecteren en zo vroegtijdig verlies van vitaliteit in opstanden vast te stellen. Ondanks dat Douglassen met een verminderde kroondichtheid hebben een sterkere negatieve reactie op de droogteperiode dan Douglassen met vollere kronen. Afnames in kroondichtheid op zichzelf kunnen niet worden gebruikt om droogtestress bij Douglasbomen vast te stellen. Echter, in combinatie met klimaatdata kan worden bepaald welke opstanden droogtestress ervaren.

Om kroonvitaliteitsanalyse breder in te kunnen zetten, moeten er enkele verbeteringen worden doorgevoerd. Momenteel is de methode van kroonvitaliteitsanalyse getest binnen twee Douglas-opstanden. Het wordt aanbevolen om eerst de betrouwbaarheid van de methode verder te onderzoeken door het testgebied uit te breiden naar Douglas-opstanden in heel Nederland. Bovendien is in deze studie alleen Douglas onderzocht, en de werking bij andere boomsoorten en de relatie tussen afname van kroonvitaliteit en jaarringbreedte bij deze soorten is niet bekend. Om hier uitspraken over te kunnen doen, zou vergelijkbaar onderzoek herhaald moeten worden bij verschillende boomsoorten.

Zodra de betrouwbaarheid van de kroonvitaliteitsanalyse is verhoogd en deze toegepast kan worden bij verschillende boomsoorten, kan er opgeschaald worden. Bij opschaling is het wenselijk dat de kroonvitaliteitsanalyse op opstandsniveau kan worden uitgevoerd. Op dit moment kunnen beheermaatregelen en de daardoor veroorzaakte verstoringen in de data nog niet worden gedetecteerd. Daarom wordt onderzoek naar een methode om verstoringen door beheermaatregelen uit te sluiten aanbevolen.

Bron vermelding

1. Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Groen, T. A., & Heurich, M. (2018). European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.009>
2. Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. T., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
3. Backx, J. (z.d.). *De toekomst is van hout*. WWF Magazine. Geraadpleegd op 2 maart 2023, van <https://magazine.wwf.nl/magazine-juni-2021/groene-bril>
4. Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
5. BMEL. (2020, 26 februari). *Waldschäden: Bundesministerium veröffentlicht aktuelle Zahlen*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Geraadpleegd op 9 maart 2023, van <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/040-waldschaeden.html>
6. Bose, A. K., Gessler, A., Bolte, A., Bottero, A., Buras, A., Cailleret, M., Camarero, J. J., Haeni, M., Hereş, A., Hevia, A., Lévesque, M., Linares, J. C., Martínez-Vilalta, J., Matías, L., Menzel, A., Sánchez-Salguero, R., Vennetier, M., Ziche, D., & Rigling, A. (2020). Growth and resilience responses of Scots pine to extreme droughts across Europe depend on predrought growth conditions. *Global Change Biology*, 26(8), 4521–4537. <https://doi.org/10.1111/gcb.15153>
7. Bunn, A. G., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Mérian, P., Qeadan, F., Zang, C., Buras, A., Cecile, A., Mudelsee, M., Schulz, M., Klesse, S., Frank, D., Visser, R., Cook, E., & Anchukaitis, K. (2021). A dendrochronology program library in R (dplR). *The Comprehensive R Archive Network*. <https://cran.r-project.org/web/packages/dplR/dplR.pdf>
8. Buras, A., Rammig, A., & Zang, C. (2021). The European Forest Condition Monitor: Using Remotely Sensed Forest Greenness to Identify Hot Spots of Forest Decline. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689220>
9. Buras, A., Van Der Maaten-Theunissen, M., Van Der Maaten, E., Ahlgrimm, S., Hermann, P., Simard, S., Heinrich, I., Helle, G., Unterseher, M., Schnittler, M., Eusemann, P., & Wilmking, M. (2016). Tuning the Voices of a Choir: Detecting Ecological Gradients in Time-Series Populations. *PLOS ONE*, 11(7), e0158346. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158346>
10. Centrum Genetische Bronnen Nederland. (z.d.). *Picea abies*. [rassenlijstbomen.nl](https://www.rassenlijstbomen.nl). Geraadpleegd op 29 maart 2023, van <https://www.rassenlijstbomen.nl/nl/Home/Soorten/Soorten-details.htm?dbid=2260&typeofpage=2142256>
11. Cook, E., & Kairiukstis, L. (2013). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Springer Science & Business Media.

12. Copini, P., Bouwman, M., Köning, L., & Sass-Klaassen, U. (2022). Droogte en hitte: effecten op herkomsten van zomereik, Japanse lariks, hybride lariks en douglas. *Vakblad Natuur Bos Landschap*, 181, 3–6. <https://edepot.wur.nl/562919>
13. Decuyper, M., Chávez, R. O., Čufar, K., Estay, S. A., Clevers, J. G. P. W., Prislan, P., Gričar, J., Črepinšek, Z., Merela, M., De Luis, M., Serrano-Notivoli, R., Rozas, V., Rozendaal, D. M. A., Bongers, F., Herold, M., & Sass-Klaassen, U. (2020). Spatio-temporal assessment of beech growth in relation to climate extremes in Slovenia – An integrated approach using remote sensing and tree-ring data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107925>
14. Decuyper, M., Chávez, R. O., Lohbeck, M., Lastra, J. M. L., Tsendbazar, N., Hackländer, J., Herold, M., & Vågen, T. (2022). Continuous monitoring of forest change dynamics with satellite time series. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112829. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112829>
15. Eilmann, B., & Rigling, A. (2012). Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiology*, 32(2), 178–187. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps004>
16. Eilmann, B., De Vries, S., Ouden, J. D., Mohren, G. M. J., Sauren, P., & Sass-Klaassen, U. (2013). Origin matters! Difference in drought tolerance and productivity of coastal Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) provenances. *Forest Ecology and Management*, 302, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.031>
17. Elfstrom, L. M., & Powers, M. D. (2023). Effects of Thinning on Tradeoffs Between Drought Resistance, Drought Resilience, and Wood Production in mature Douglas-fir in Western OR, USA. *Canadian Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0235>
18. Foltran, E. C., Ammer, C., & Lamersdorf, N. (2020). Douglas fir and Norway spruce admixtures to beech forests along in Northern Germany–Are soil nutrient conditions affected?. *BioRxiv*, 2020-09.
19. Forest Ecology and Forest Management Group Wageningen University. (2018). *Opbrengsttabellen Nederland 2018* (10.3920/978-90-8686-876-6). Wageningen Academic Publishers. Geraadpleegd op 28 maart 2023, van https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj2f_Rwv79AhWCg_0HHS3JBQMqFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Flibrary.wur.nl%2FWebQuery%2Fwurpubs%2F541350&usg=AOvVaw19g50E-OclkIbSJm3Dvm1Y
20. Gazol, A., Valeriano, C., Cantero, A., Vergarechea, M., & Camarero, J. J. (2022). Douglas Fir Growth Is Constrained by Drought: Delineating the Climatic Limits of Timber Species under Seasonally Dry Conditions. *Forests*, 13(11), 1796. <https://doi.org/10.3390/f13111796>
21. *Green Deal Houtbouw Duurzaam uit de crisis: Gericht op de uitvoering van de schaalsprong houtbouw in de Metropoolregio Amsterdam 2021-2025*. (2021, oktober). metropoolregioamsterdam. Geraadpleegd op 2 maart 2023, van <https://www.metropoolregioamsterdam.nl/wp-content/uploads/2021/11/MRA-Convenant-Houtbouw-finale-versie-21-10-2021.pdf>
22. Grieb, P., Guehl, J., & Aussenac, G. (1988). The effects of soil and atmospheric drought on photosynthesis and stomatal control of gas exchange in three coniferous species. *Physiologia Plantarum*, 73(1), 97–104. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1988.tb09199.x>
23. Grissino-Mayer, H. D. (2001). EVALUATING CROSSDATING ACCURACY: A MANUAL AND TUTORIAL FOR THE COMPUTER PROGRAM COFECHA. *Tree-ring Research*. <https://arizona.openrepository.com/handle/10150/251654>

24. Hansen, M. C., Potapov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A. M., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
25. Helama, S., Lindholm, M., Timonen, M., & Eronen, M. (2004). Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a comparison of tree-ring standardization methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 79(3–4), 239–254. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0077-0>
26. Holmes, R. T. (1983). Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-ring Bulletin*. <https://arizona.openrepository.com/handle/10150/261223>
27. Howe, G. T., Aitken, S. N., Neale, D. B., Jermstad, K. D., Wheeler, N. J., & Chen, T. H. H. (2003). From genotype to phenotype: unraveling the complexities of cold adaptation in forest trees. *Canadian Journal of Botany*, 81(12), 1247–1266. <https://doi.org/10.1139/b03-141>
28. IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
29. Jansen, J., Schoonderwoerd, Mohren, G. M. J., & den Ouden, J. (2016). *Groei en productie van douglas in Nederland: Beckings dunningsproeven ontsloten*. Wageningen Academic Publishers. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-827-8>
30. Jansen, P. A. (2018). *Praktijkboek bosbeheer* (Vols. 523–526). Stichting Probos en Inverde.
31. Kadaster. (z.d.). *PDOK Viewer*. PDOK Viewer. Geraadpleegd op 30 maart 2023, van <https://app.pdok.nl/viewer/#x=160000&y=455000&z=3&background=BRT-A%20standaard&layers=>
32. Klaassen, R. (2018). *Houtvademeccum: Vol. 11e herziene druk*. Uitgeverij Vakbladen.com & Smartwave.
33. KNMI. (z.d.). *KNMI - Achtergrondinformatie neerslagindexen SPI en SPEI*. Geraadpleegd op 20 maart 2023, van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/achtergrondinformatie-neerslagindex-spi>
34. KNMI. (z.d.). *KNMI - Maand- en jaarwaarden*. Geraadpleegd op 19 mei 2023, van <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/maandgegevens>
35. Ma, Q., Huang, J., Hänninen, H., & Berninger, F. (2019). Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. *Global Change Biology*, 25(1), 351–360. <https://doi.org/10.1111/gcb.14479>
36. Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. (2020). *Bos voor de toekomst: Uitwerking ambities en doelen landelijke Bossenstrategie en beleidsagenda 2030*. In *Rijksoverheid* (Nr. 1120–001). Geraadpleegd op 9 maart 2023, van https://open.overheid.nl/repository/ronl-d6ac7db2-0d36-45b0-9507-f76638a48c0d/1/pdf/Bos%20voor%20de%20toekomst_Uitwerking%20ambities%20en%20doelen%20landelijke%20Bossenstrategie%20en%20beleidsagenda%202030.pdf
37. Posit Software. (2023). *RStudio* (2023.03.0 Build 386) [Software].

38. Remote Sensing Solution & Naturewald Akademie. (z.d.). *Waldmonitor*. Waldmonitor. Geraadpleegd op 20 maart 2023, van <http://map3d.remote-sensing-solutions.de/waldmonitor-deutschland/>
39. Schelhaas, M., Teeuwen, S., Oldenburger, J., Beerkens, G., Velema, G., Kremers, J., Lerink, B., Paulo, M., Schoonderwoerd, H., Daamen, W., Dolstra, F., Lusink, M., Van Tongeren, K., Scholten, T., Pruijsten, I., Voncken, F., & Clerkx, A. (2022). *Zevende Nederlandse Bosinventarisatie : methoden en resultaten*. <https://doi.org/10.18174/571720>
40. Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., Vitasse, Y., Beierkuhnlein, C., Damm, A., Gharun, M., Grams, T. E. E., Hauck, M., Hajek, P., Hartmann, H., Hiltbrunner, E., Hoch, G., Holloway-Phillips, M., Körner, C., Larysch, E., Lübke, T., Nelson, D., Rammig, A., . . . Kahmen, A. (2020). A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>
41. Schwarz, J., Skiadaresis, G., Kohler, M., Kunz, J., Schnabel, F., Vitali, V., & Bauhus, J. (2020). Quantifying Growth Responses of Trees to Drought—a Critique of Commonly Used Resilience Indices and Recommendations for Future Studies. *Current Forestry Reports*, 6(3), 185–200. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00119-2>
42. Seim, A., Treydte, K., Trouet, V., Frank, D. A., Fonti, P., Tegel, W., Panayotov, M., Fernández-Donado, L., Krusic, P. J., & Büntgen, U. (2015). Climate sensitivity of Mediterranean pine growth reveals distinct east-west dipole. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2503–2513. <https://doi.org/10.1002/joc.4137>
43. Senf, C., Buras, A., Zang, C., Rammig, A., & Seidl, R. (2020). Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1>
44. Song, Y., Sass-Klaassen, U., Sterck, F. J., Goudzwaard, L., Akhmetzyanov, L., & Poorter, L. (2021). Growth of 19 conifer species is highly sensitive to winter warming, spring frost and summer drought. *Annals of Botany*, 128(5), 545–557. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab090>
45. Song, Y., Sterck, F., Sass-Klaassen, U., Li, C., & Poorter, L. (2022). Growth resilience of conifer species decreases with early, long-lasting and intense droughts but cannot be explained by hydraulic traits. *Journal of Ecology*, 110(9), 2088–2104. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13931>
46. Spiecker, H., Lindner, M., & Schuler, J. K. (2019). *Douglas-fir: An Option for Europe* [PDF]. European Forest Institute. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiRt9TI2NH9AhWUhP0HHb6SAeAQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fefi.int%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Ffiles%2Fpublication-bank%2F2019%2Fefi_wsctu9_2019.pdf&usg=AOvVaw1l92lpv3En5Wmt5kmgupWq
47. Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J. (2013). World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792–2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
48. St Clair, J. B., & Howe, G. T. (2007). Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates. *Global Change Biology*, 13(7), 1441–1454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01385.x>
49. Stobbelaar, E. (2021). *The effects of drought on Douglas fir productivity in the Netherlands*. Wageningen University & Research.
50. Thomas, F. M., Rzepecki, A., & Werner, W. (2022). Non-native Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Central Europe: Ecology, performance and nature

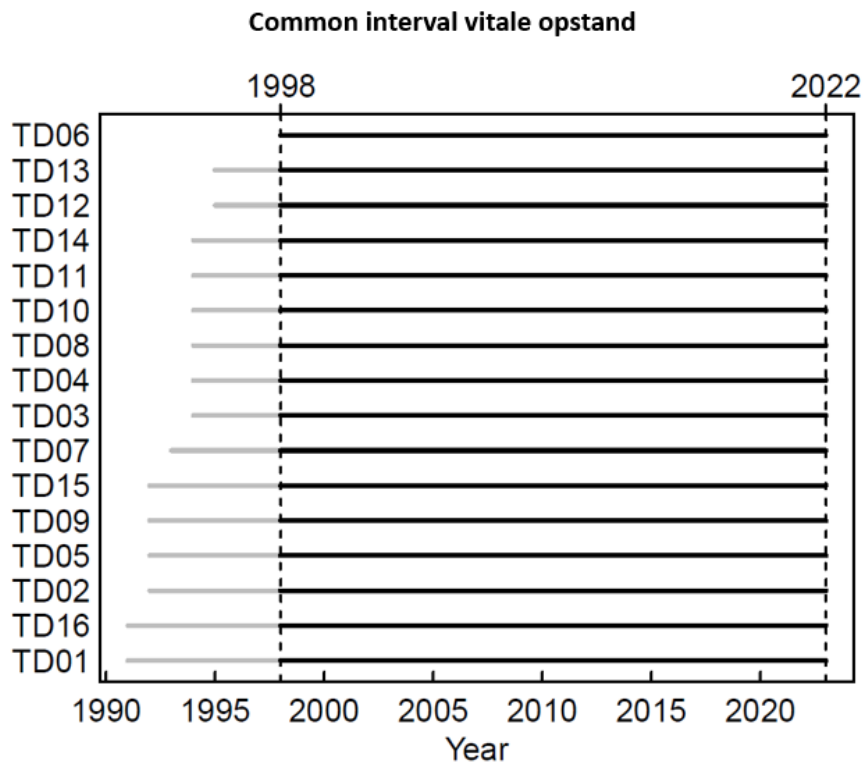
- conservation. *Forest Ecology and Management*, 506, 119956.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119956>
51. Thomas, F. M., Werner, W., & Eichstaedt, R. (2015). Interaction between Douglas fir and European beech - Investigations in pure and mixed stands. *Forstarchiv*, 86.
<https://doi.org/10.4432/0300-4112-86-83>
 52. Toussaint, L. (2021). *Thinning as a method to increase growth and mitigate climate change effects on Douglas-fir* [Bachelor thesis]. Wageningen University & Research.
 53. Van Pelt, D. Z. (2022). *Drought responses of common beech and sessile oak growing in ancient woodlands in the Netherlands*. [Masterscriptie]. Wageningen university and research.
 54. Verenigde Naties. (2021, 3 december). *Duurzame Ontwikkelingsdoelstellingen - Verenigde Naties - Nederlands*. Verenigde Naties - Nederlands. Geraadpleegd op 10 juni 2023, van <https://unric.org/nl/duurzame-ontwikkelingsdoelstellingen/>
 55. Verheyen, K., Broeck, A.V., & Den Ouden, J. (2016). De verspreiding van boomsoorten. In Den Ouden, J., Muys, B., Mohren, F., & Verheyen, K. (Eds.), *Bosecologie en Bosbeheer* (pp. 93-101). Uitgeverij Acco.
 56. Washington state department of Natural Resources. (z.d.). Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*). In *Washington state department of Natural Resorces*. Geraadpleegd op 28 maart 2023, van https://www.dnr.wa.gov/publication/lm_hcp_east_old_growth_hires_part10.pdf
 57. Welle, T., Aschenbrenner, L., Kuonath, K., Kirmaier, S., & Franke, J. (2022). Mapping Dominant Tree Species of German Forests. *Remote Sensing*, 14(14), 3330.
<https://doi.org/10.3390/rs14143330>
 58. Williams, M. L., & Dumroese, R. K. (2013). Preparing for Climate Change: Forestry and Assisted Migration. *Journal of Forestry*, 111(4), 287–297.
<https://doi.org/10.5849/jof.13-016>
 59. Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431–436.
<https://doi.org/10.1111/ecog.01335>
 60. Zoeteman, R. (2021). *Productivity of Douglas fir provenances under drought in the Netherlands* [Masterscriptie]. Wageningen university and research.

Bijlagen

Bijlage 1

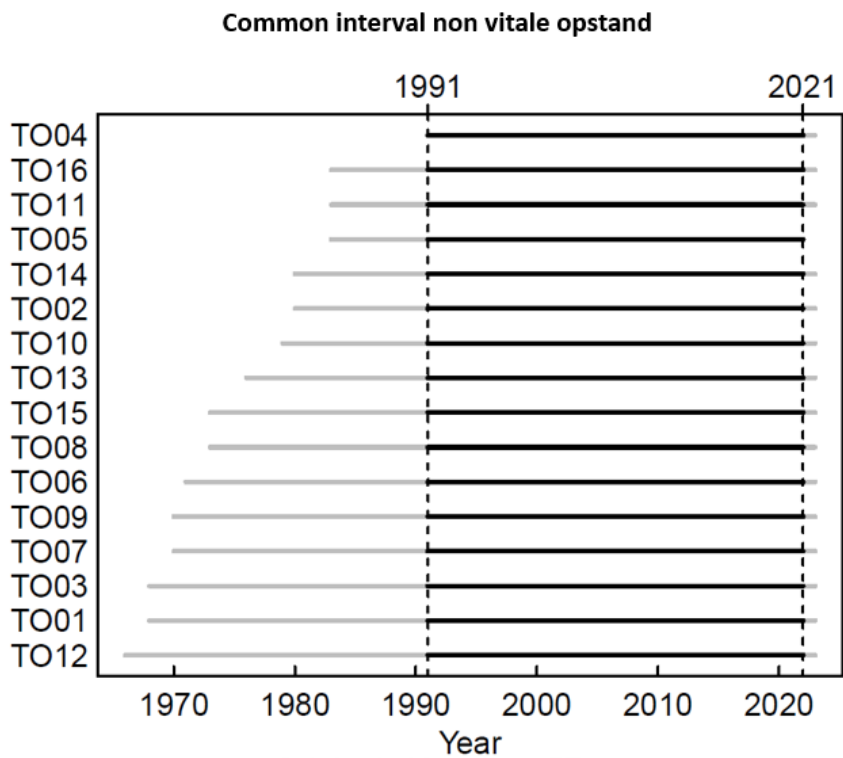
opstandsgegevens	vitaal		niet-vitaal	
locatie	51°30'14.0"N 5°05'32.8"O		51°29'15.2"N 5°12'17.6"O	
boomsoort	Douglas		Douglas	
aantal bemonsterde bomen	16		16	
gem DBH (cm)	39,1		42,7	
gem hoogte (m)	22		24	
kiemjaar opstand	1987		1976	
bodem	Duinvaaggronden; leemarm en zwak lemig fijn zand (Zd21)		Haarpodzolgronden; leemarm en zwak lemig fijn zand (Hd21)	
grond water trap	VIIIId		VIIIlo	
GLG	254		231	
GHG	161		93	
andere soorten	Onderplant met esdoorn		Hemlockspar, in rijen door de opstand	
beheermaatregelen	09/10	Aanleg dunningspaden, toekomstbomen selectie. Vrijzetten T-boom, 2 tot 3 bomen verwijderd per T-boom. T-bomen opgesnoeid tot 6 meter.		geen eerdere beheersgeschiedenis
	12/13	Overstap naar QD beheer, T-Bomen volledig vrij gesteld	14	dunning uitgevoerd
	15/16	Derde dunning 21 kuub/ha	18	dunning uitgevoerd
	15/16	QD bomen ondergeplant met esdoorn, steenmeel proef bij e QD bomen		
overig	voorheen beheerd als coulissen bos			

Bijlage 2 common interval



Original: 16 series, 32 years

Common Interval (type='series'): 16 series x 25 years = 400



Original: 16 series, 57 years

Common Interval (type='series'): 16 series x 31 years = 496